

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Vliv skenovací strategie na zbytkové vnitřní napětí oceli  
316L v procesu aditivní výroby metodou SLM**

Effect of Scanning Strategy on Residual Internal Stress of  
316L Steel in SLM Process

Diplomová práce

Studijní program:	N2301-Strojní inženýrství
Studijní obor:	2303T002-Strojírenská technologie
Autor diplomové práce:	Bc. Petr Blaták
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Jiří Hajnyš, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Blaták**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Téma: **Vliv skenovací strategie na zbytkové vnitřní napětí oceli 316L v procesu aditivní výroby metodou SLM**  
**Effect of Scanning Strategy on Residual Internal Stress of 316L Steel in SLM Process**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Experimentální návrh řešení problematiky.
4. Kvalitativní zhodnocení řešeného návrhu.
5. Diskuze a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

HAIDER A., HASSAN G., KAMRAN M. *Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V*, Materials Science and Engineering: A, Volume 712, 2018, Pages 175-187, ISSN 0921-5093

RAVI K., MORGAN R., SUNDAR V. *Effect of process parameters on the Selective Laser Melting (SLM) of tungsten*, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Volume 71, 2018, Pages 315-319, ISSN 0263-4368


TUCHO W., LYSNE V., AUSTBO H., KVERNELAND V., HANSEN V. *Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L*, Journal of Alloys and Compounds, Volume 740, 2018, Pages 910-925, ISSN 0925-8388

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

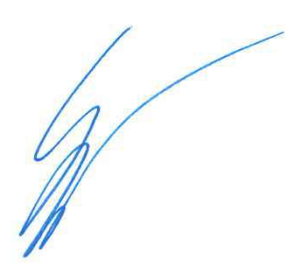
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že jsem celou tuto diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020



Podpis autora

**Prohlašuji, že:**

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020



Podpis autora

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Petr Blaták

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Všechnovice 168, 753 53

## PODĚKOVÁNÍ

Na samém počátku této diplomové práce bych rád poděkoval svému vedoucímu panu Ing. Jiřímu Hajnyšovi, Ph.D. za vedení, zodpovězení všech vzniklých otázek a za zajištění výroby zkušebních vzorků v laboratoři aditivních technologií Protolab VŠB – TUO.

Diplomovou prací vygradovalo mnohaleté snažení, zdolávání dílčích cílů a překážek při studiu. Proto chci poděkovat také rodině, díky které jsem mohl plnohodnotně studovat a dojít do samotného závěru, v kterém jsem mohl celé studium úspěšně završit a splnit tak jeden z dlouhodobých životních cílů.

Tato diplomová práce byla vypracována za podpory projektu „Specifický výzkum inovativních technologií výroby“, reg. č. „SP2020/27“ financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BLAŤÁK, P. *Vliv skenovací strategie na zbytkové vnitřní napětí oceli 316L v procesu aditivní výroby metodou SLM*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 78 s. Vedoucí práce: Hajnýš, J.

Tato diplomová práce se zabývá vlivem skenovací strategie a vybraných procesních parametrů na velikost zbytkových vnitřních napětí vzorků z oceli AISI 316L vyrobených metodou SLM. Teoretická část práce seskupuje poznatky nutné k provedení a pochopení experimentu. Jsou zde obsaženy kapitoly týkající se aditivní výroby s důrazem na zbytková napětí a deformace v procesu SLM. Experimentální část se již věnuje samotnému experimentu od analýzy problému, přes jeho návrh a realizaci až po diskuzi a zhodnocení dosažených výsledků. Zkušební vzorky vycházející z metody BCM byly vyrobeny na stroji Renishaw AM 400 a po jejich separaci ze základní desky bylo na mikroskopu snímáno uvolněné zbytkové napětí v podobě deformace, jehož hodnota byla stanovena v CAD softwaru. Nakonec byl posouzen vliv testovaných parametrů na zbytková napětí.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

BLAŤÁK, P. *Effect of Scanning Strategy on Residual Internal Stress of 316L Steel in SLM Process*: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2020, 78 p. Thesis head: Hajnýš, J.

This master thesis deals with the effect of scanning strategy and selected process parameters on the residual internal stresses of AISI 316L steel samples produced by SLM method. Theoretical part of the work groups the knowledge necessary to perform and understanding the experiment. There are chapters concerning additive manufacturing with emphasis on residual stresses and deformations in SLM process. The experimental part is focused to the experiment from the analysis of the problem, through design and implementation, to discussion and evaluation of the achieved results. Test samples based from the BCM method and were made on a Renishaw AM 400 machine. After separation samples from the base plate was scanned the released residual stress as deformation on the microscope. Deformation was measured in CAD software. Finally was assessed and evaluated influence of the tested parameters on residual stresses.

# OBSAH

<b>Seznam použitých značek a zkratk</b> .....	<b>9</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>13</b>
<b>TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE</b> .....	<b>14</b>
<b>1 Aditivní výroba</b> .....	<b>14</b>
1.1 Úvod do aditivní výroby .....	14
1.2 Rozdělení aditivní výroby .....	16
1.3 Aditivní výroba kovů .....	17
<b>2 Metoda SLM</b> .....	<b>19</b>
2.1 Úvod do metody SLM .....	19
2.2 Parametry procesu.....	21
2.2.1 Skenovací strategie .....	23
2.3 Parametry práškového kovu.....	27
<b>3 Zbytková napětí a deformace v SLM</b> .....	<b>28</b>
3.1 Úvod do problematiky .....	28
3.2 Dělení zbytkových napětí .....	29
3.3 Mechanismy tvorby a dopady zbytkových napětí .....	30
3.4 Potlačení tvorby a redukce zbytkových napětí .....	31
3.5 Měření zbytkových napětí .....	32
<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE</b> .....	<b>34</b>
<b>4 Analýza problému</b> .....	<b>34</b>
4.1 Stanovení cílů .....	34
4.2 Formulace otázek .....	35
4.3 Stanovení hypotéz.....	35
<b>5 Návrh experimentu</b> .....	<b>36</b>
5.1 Zvolený stroj Renishaw AM 400.....	36
5.2 Testovaný práškový kov 316L.....	38
5.3 Vybrané testované proměnné a počet vzorků .....	41
5.3.1 Statistická metodika DoE a Taguchiho metoda.....	41
5.4 Zvolená metoda měření BCM.....	42
5.4.1 Navržené zkušební vzorky .....	43

5.5	Zvolený mikroskop Alicona Infinite Focus .....	45
<b>6</b>	<b>Realizace a průběh experimentu.....</b>	<b>46</b>
6.1	Výrobní proces zkušebních vzorků.....	46
6.2	Snímání deformace zkušebních vzorků .....	48
6.3	Měření deformace vzorků v CAD softwaru .....	49
<b>7</b>	<b>Kvalitativní zhodnocení.....</b>	<b>51</b>
7.1	Metodika vyhodnocování dat.....	51
7.2	Hodnocení a diskuze vlivu parametrů .....	54
7.2.1	Vliv skenovací strategie .....	54
7.2.2	Vliv výkonu laseru .....	57
7.2.3	Vliv výkonu laseru se zohledněním předehřevu .....	58
7.2.4	Vliv předehřevu substrátu.....	61
7.2.5	Vliv velikosti pruhu a ostrova .....	62
7.2.6	Vliv šrafovací vzdálenosti .....	64
7.3	Komplexní zhodnocení parametrů a diskuze.....	65
7.4	Zhodnocení experimentu a diskuze opatření .....	68
<b>Závěr.....</b>	<b>.....</b>	<b>71</b>
<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>.....</b>	<b>73</b>



## Seznam použitých značek a zkratek

Značka	Popis	Jednotka
$\bar{x}$	Aritmetický průměr	-
$\simeq$	Přibližně se rovná	-
2D	Two Dimensional – Dvourozměrný	-
3D	Three Dimensional – Třírozměrný	-
A	Tažnost při přetržení – Trvalé poměrné prodloužení při přetržení	%
$A_a$	Absorpce záření	-
AC	Alternating Current – Střídavé napětí	-
AISI	American Iron and Steel Institut – Americký institut pro ocel	-
AM	Additive Manufacturing – Aditivní výroba	-
ANOVA	Analysis of Variance – Analýza rozptylu	-
ASLM	Anchorless Selective Laser Melting – SLM bez podpor	-
ASTM	American Society for Testing and Materials – Americká spol. pro test.	-
$A_t$	Hladina akustického tlaku	dB
BCM	Bridge Curvature Method – Metoda zakřivení mostu	-
BJ	Binder Jetting – Tryskání pojiva	-
CAD	Computer Aided Design – Počítačem podporované projektování	-
CAM	Computer Aided Manufacturing – Počítačem podporovaná výroba	-
CCM	Crack Compilance Method – Konturová metoda	-
CNC	Computer Numeric Control – Počítačem řízený stroj	-
$c_p$	Měrná tepelná kapacita	$J \cdot (m \cdot K)^{-1}$
ČSN	Česká státní norma	-
D	Strukturní hustota	%
d	Průměr laserového paprsku	$\mu m$
DED	Direct Energy Deposition – Přímé energetické nanášení	-
Dif	Diference	-
$D_l$	Šířka lázně	mm
DLP	Digital Light Processing – Digitální zpracování světlem	-
DMLS	Direct Metal Laser Sintering – Přímé laserové sintrování kovů	-
$D_n$	Šířka návaru	mm
DoE	Design of Experiment – Metoda návrhu experimentu	-
DOD	Drop on Demand – Injekt technologie	-
$d_p$	Průměr částice prášku	$\mu m$
E	Modul pružnosti v tahu	GPa
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing – Aditivní výroba pomocí elektronového paprsku	-
EBM	Electron Beam Melting – Tavení elektronovým paprskem	-

EDM	Electrical Discharge Machining – Elektroerozivní obrábění	-
EN	Euronorm – Evropská norma	-
ET	Doba trvání pulzu	$\mu\text{s}$
$E_v$	Objemová hustota vyzářené energie	$\text{J}\cdot\text{mm}^{-3}$
f	Počet faktorů	-
F, F krit	F hodnota, kritická F hodnota	-
FDM	Fused Deposition Modeling – Elektroerozivní obrábění	-
$\text{Fe}_\alpha$	Austenit – Intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe $\alpha$	-
$\text{Fe}_\delta$	Delta ferit – Intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe $\delta$	-
FFF	Fused Filament Fabrication – Výroba fúzí vlákna	-
H	Hypotéza	
$H_0$	Nulová hypotéza	-
$H_A$	Alternativní hypotéza	-
$h_d$	Hatch Distance – Šrafovací vzdálenost	$\mu\text{m}$
HIP	High Isostatic Pressing – Izostatické lisování za tepla (hipování)	-
HMP	Hybrid Metal Printing – Hybridní kovový tisk	-
$\text{HV}_{0,5}$	Hardness Vickers – Tvrdost dle Vickerse (zatížení 4,903 N)	-
CH	Skenovací strategie Chessboard	-
I	Elektrický proud	A
ISO	International Organization for Standardization	-
$I_v$	Intenzita laserového paprsku	$\text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$
l	Počet úrovní faktorů	-
LENS	Laser Engineering Net Shape – Aditivní výroba laserem	-
$l_{\text{CH}}$	Velikost ostrůvku	mm
LMD	Laser Metal Deposition – Depozice laserovým paprskem	-
$l_s$	Velikost pruhu	mm
M	Skenovací strategie Meander	-
Ma	Martenzit – Přesycený tuhý roztok uhlíku v železe $\alpha$	-
MJ	Material Jetting – Nanášení materiálu	-
MJF	Multi Jet Fusion – Fúze materiálu pomocí více trysek	-
MKK	Mezikrystalová koroze	-
MKP	Metoda konečných prvků	-
MS	Střední čtverec	-
n	Počet experimentů	-
N	Počet měření	-
Nd:	Izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ), který je	-
YAG	dopovaný ionty $\text{Nd}^{3+}$	-
No	Number – číslo	-
NPJ	Nano Particle Jetting – Nano částicové tryskání	-

$n_v$	Počet vrstev	-
$p$	p hodnota	-
$P, P_{\max}$	Výkon laseru, Maximální výkon laseru	W
PBF	Powder Bed Fusion – Fúze práškové vrstvy	
$p_k$	Tlak v pracovní komoře	kPa
$p_{\min}$	Tlak vakua v komoře	kPa
$p_p$	Čistota plynu	ppm
$p_{xy}, p_z$	Přesnost polohování	$\mu\text{m}$
$Q$	Objem plynu v pracovní komoře	l
$Q_{O_2}$	Obsah kyslíku	ppm
$Q_p$	Spotřeba plynu	$\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$
$Q_s$	Tepelný příkon svařování	$\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$
$R^2$	Koeficient determinace	
$R_a$	Střední aritmetická úchylka posuzovaného profilu	$\mu\text{m}$
$R_m$	Mez pevnosti	MPa
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu při plastické deformaci 0,2 % vzorku	MPa
$s$	Vzdálenost mezi pulzy	$\mu\text{m}$
S	Skenovací strategie Stripes	-
SLA	Stereolithography – Stereolitografie	-
SLM	Selective Laser Melting – Selektivní tavení laserem	-
SLS	Selective Laser Sintering – Selektivní spékání laserem	-
SMODCH	Směrodatná odchylka	-
SS	Součet čtverců	-
STL	Standard Tessellation Language – Standardní teselační soubor	-
$s_x$	Směrodatná odchylka	-
$t$	Tloušťka práškové vrstvy	$\mu\text{m}$
$T$	Teplota předehřevu substrátu	$^{\circ}\text{C}$
TGM	Tem. Gradient Mechanism – Mechanismus teplotního gradientu	-
$T_i$	Teplota interpass (mezihousesnková teplota)	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{krit}}$	Kritická hodnota Grubbsova testu	-
$T_{\max}$	Hodnota Grubbsova testu pro maximum	-
$T_{\min}$	Hodnota Grubbsova testu pro minimum	-
$T_n$	Teplota vrstvy	$^{\circ}\text{C}$
$T_t$	Teplota tání	$^{\circ}\text{C}$
$U$	Elektrické napětí	V
UV	Ultra Violet – Ultra fialový	-
$v$	Rychlost skenování	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
$V$	Otázka	
$v_p$	Rychlost polohování	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$

vs	Versus – Proti	-
$v_t$	Rychlost tavení	$\text{cm}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$
x	Výsledná hodnota	-
$x_l$	Minimální hodnota	-
$X_l, Y_l$	Skenovací posunutí mezi vrstvami	$\mu\text{m}$
$x_i$	Jednotlivé naměřené hodnoty	-
$x_n$	Maximální hodnota	-
XRD	X-Ray Diffraction – Rentgenová difrakce	-
$\alpha$	Hladina významnosti	-
$\alpha_t$	Součinitel teplotní délkové roztažnosti	$\text{K}^{-1}$
$\gamma$	Měrná elektrická vodivost	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$
$\varepsilon_{pl}$	Plastická deformace	-
$\varepsilon_T$	Emisivita	-
$\varepsilon_{th}$	Tepelná deformace	-
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W} (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
$\lambda_l$	Vlnová délka laserového paprsku	$\text{nm}$
$\rho$	Hustota materiálu	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\sigma^2$	Rozptyl	-
$\sigma_{comp}$	Tlaková napětí	$\text{MPa}$
$\sigma_I$	Napětí I. druhu (Makroskopická)	$\text{MPa}$
$\sigma_{II}$	Napětí II. druhu (Mikroskopická)	$\text{MPa}$
$\sigma_{III}$	Napětí III. druhu (Submikroskopická)	$\text{MPa}$
$\sigma_{tens}$	Tahová napět	$\text{MPa}$
$\varphi$	Úhel pootočení mezi vrstvami	$^\circ$
$\psi$	Úhel deformace vzorků	$^\circ$

## Úvod

Aditivní technologie jsou tu s námi již mnoho let, jejich vývoj má však stále progresivní charakter. 3D tiskárny pracující s plasty jsou v současné době natolik dostupné, že se již stávají běžnou výbavou domácích dílen. Podobný trend může nastat i v případě profesionálních aditivních technologií produkujících funkční kovové součásti.

Nejpopulárnější je v tomto ohledu metoda selektivního laserového tavení (SLM) patřící pod technologii fúze práškové vrstvy. Technologie SLM umožňuje výrobu složitých kovových dílů s takřka plně hustou strukturou a s mechanickými vlastnostmi srovnatelnými s mechanickými vlastnostmi konvenčně zpracovávaných materiálů. Výroba probíhá na základové desce vrstvu po vrstvě, kdy se každá vrstva prášku selektivně taví a konsoliduje v inertní atmosféře pomocí laserového paprsku. I přesto, že tyto technologie mají celou řadu výhod, je zde také stále celá řada otázek, na které je nutno najít odpovědi formou celé řady experimentů. Zejména je nutno najít nejvhodnější procesní parametry pro určité materiály.

Proces SLM, který je založen na fúzi laserem je však nesmírně složitým procesem, který je velice citlivý na jakoukoli změnu procesních parametrů. Při nevhodném návrhu těchto parametrů je velké riziko vzniku nežádoucích jevů, jako jsou deformace nebo v horším případě dokonce trhliny. Deformace jsou způsobené uvolněním zbytkových vnitřních napětí, k jejichž uvolnění dochází nejčastěji po separaci výrobků ze základní desky. Vnitřní zbytková napětí vznikají v důsledku selektivního bodového a intenzivního ohřevu. Na tvorbě vnitřních zbytkových napětí se podílí primární mechanismus teplotního gradientu a sekundární ochlazovací mechanismus. Zásadní vliv na zbytková vnitřní napětí má právě způsob vyplnění vrstvy skenovacími vektory, tedy skenovací strategie. Optimalizovat je však třeba také délku skenovacích vektorů, šrafovací vzdálenost, výkon laseru a předeřhřev.

Primárním cílem této práce je zjistit jaký má vliv skenovací strategie na velikost zbytkových vnitřních napětí u vzorků vyrobených z oceli 316L metodou SLM. Sekundárním cílem pak je zjistit vliv vybraných procesních parametrů a ověřit praktičnost a relevantnost daného experimentu. Experiment má splňovat praktičnost tak, aby jej bylo možné pravidelně co nejjednodušeji a nejrychleji uskutečňovat v běžných výrobních podmínkách. To vše za splnění dostatečné vypovídající hodnoty experimentu, a to i při opakovatelnosti měření. K úspěšnému navržení, provedení a vyhodnocení experimentu mají sloužit teoretické znalosti a analýzy výsledků studií zabývajících se obdobnou problematikou. Seskupení potřebných teoretických znalostí a odborných studií je pak cílem teoretické části této práce.

# TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

## 1 Aditivní výroba

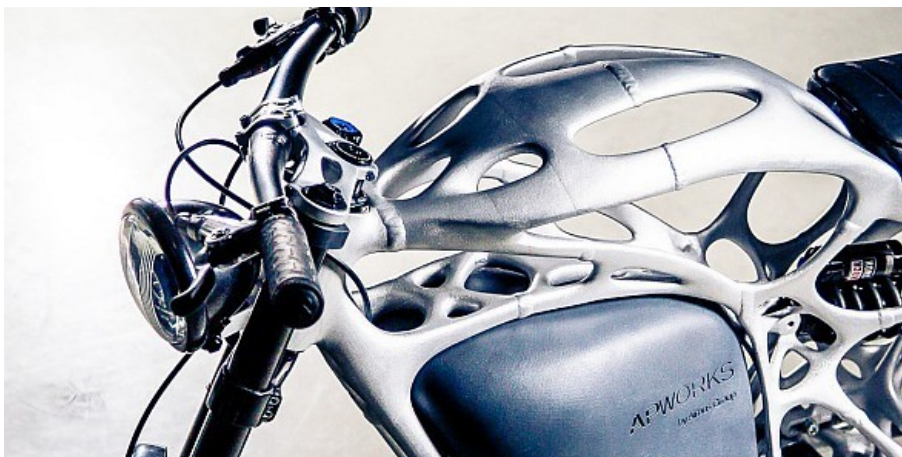
### 1.1 Úvod do aditivní výroby

Aditivní výroba (AM) nebo také 3D tisk byl původně vyvinut pro rychlou výrobu prototypů, a to již na počátku roku 1980. Jako první byla vyvinuta stereolitografie (SLA) a později také metoda selektivního spékání laserem (SLS). Od roku 1995 se začala vyvíjet metoda selektivního tavení laserem (SLM), která byla vyvinuta speciálně pro výrobu funkčních kovových komponent s plně hustou strukturou. A v roce 1997 byla SLM v Německu také patentována.<sup>1,2</sup>

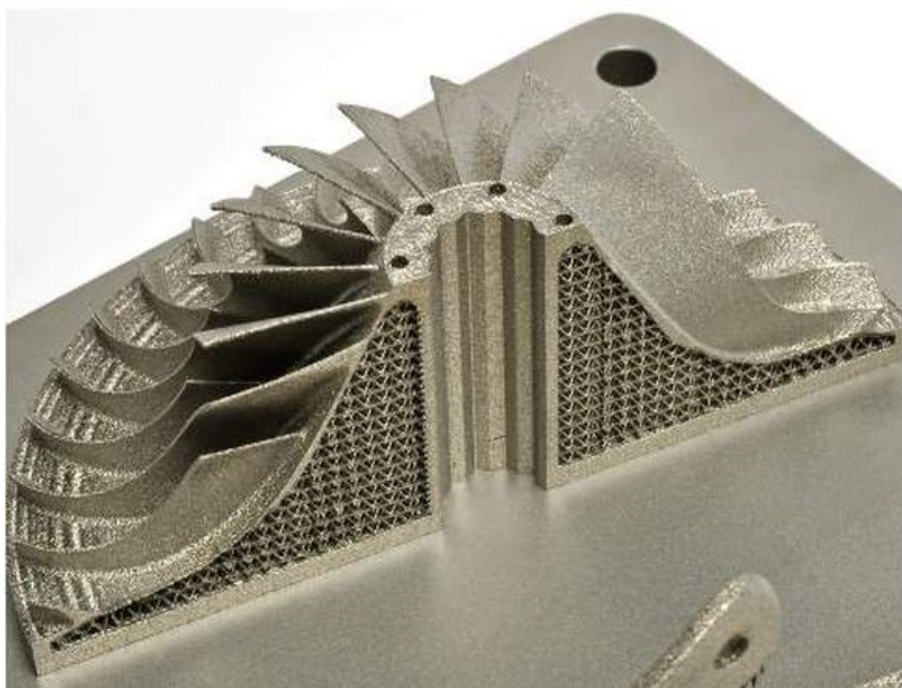
Veškeré AM procesy spočívají v postupném spojování materiálu po jednotlivých vrstvách, které jsou předem definovány dle 3D CAD modelu. Spojení materiálu a vrstev probíhá různými fyzikálními nebo chemickými reakcemi. Narozdíl například od obrábění, tedy nedochází k úběru materiálu, ale k jeho nabývání dle předlohového 3D CAD modelu. Dnešní technologie pracující s kovy lze tedy přirovnat spíše ke svařování. V současné době lze zhotovovat funkční výrobky velmi složitých tvarů s celou řadou dutin, které jinak prakticky nelze provést. Oproti výrobku zhotoveného konvenčními technologiemi lze díky AM zhotovit topologicky optimalizovaný výrobek stejné pevnosti s mnohem nižší hmotností a menšími rozměry. Sestavy, které se běžně skládají z více menších kusů, lze za použití AM nahradit jedním menším složitým dílcem, a to bez použití spojovacího materiálu nebo svařování. U AM odpadá jakákoliv potřeba vyvíjet a nakupovat složité přípravky, formy, nástroje a polotovary, často je však třeba při výrobě užít dočasných podpor výrobku. K samotné výrobě tak lze přejít velice rychle. Je však třeba připravit 3D CAD model a vhodně sladit parametry procesu, stroje a materiálu. Právě experimentální ověření určitého materiálu na daném stroji a optimalizace vstupních parametrů je velmi důležitá pro zhotovení výrobku požadovaných vlastností. Výsledná přesnost výrobku a drsnost jeho povrchu je s výjimkou funkčních ploch zpravidla dostačující a odpadá tak další obrábění, čímž se šetří čas a materiál. Technologie AM jsou velice výhodné pro výrobu velmi složitých součástí zejména v kusové a malosériové výrobě. Ke zhotovení lze použít celá plejáda materiálů, včetně těch, které jsou konvenčními technologiemi takřka nezpracovatelné. Je však třeba vzít v potaz pořizovací náklady na zavedení AM do podniku. Z těchto důvodů jsou profesionální AM aplikovány zejména pro výrobu složitých komponent (Obr. 1), prototypů a náhradních dílů v leteckém, kosmickém, automobilovém a zdravotnickém průmyslu. Typické výrobky jsou například formy s konformním chlazením, lidské implantáty na míru nebo dílce s odlehčenou mřížkovou konstrukcí, viz Obr. 2. Nevýhodou prakticky všech AM je poměrně pomalá výroba, omezené rozměry výrobku a častější strukturní vady. Prudký rozvoj AM zapříčiňuje u některých metod pokles pořizovacích nákladů natolik, že se dostávají nejen do běžných firem, ale i do škol a domácích dílen.<sup>2,5</sup>



Postup spočívá v převedení 3D CAD modelu do standardního teselačního souboru (STL), který původní geometrii převede na trojúhelníkovou síť. Tento soubor vznikl původně pro metodu SLA. Kvalita tisku je závislá na kvalitě STL dat. Poté je v podpůrném programu daného stroje model rozdělen na 2D vrstvy, případně jsou doplněny dočasné podpory. Dále jsou definovány veškeré volitelné parametry výroby. Připravený model je poté odeslán do stroje. Nakonec probíhá na stavěcí desce stroje samotná výroba po definovaných vrstvách, dokud není výrobek zcela zhotoven.<sup>2,3</sup>



Obr. 1 Speciální konstrukce vzniklá svařováním dílců vyrobených metodou SLM<sup>4</sup>



Obr. 2 Odlehčená vnitřní konstrukce<sup>4</sup>

## 1.2 Rozdělení aditivní výroby

V současné době jsou AM natolik rozšířené, že je bylo nutné systematicky roztrždit do skupin. Nejzákladnější rozdělení je dle stavu nebo druhu základního materiálu a použité technologie. Druh základního materiálu bývá nejčastěji kov nebo slitina, polymer, písek, keramika, vosk, kompozit nebo také různé kombinace. Dle vstupního stavu základního materiálu do procesu lze AM rozdělit do čtyř skupin: materiál v kapalném stavu, materiál ve formě plátů, materiál ve formě prášku a materiál ve formě drátu či struny.<sup>2, 5</sup>

Dle normy ISO/ASTM 52900:2015 se AM rozděluje do sedmi skupin dle použité technologie viz Obr. 3:<sup>6, 7</sup>

### a) Vytlačování materiálu (Material Extrusion):

Materiál (polymer, kompozit, kov s pojivem) nejčastěji ve formě struny je při průchodu hlavou taven a poté tryskou extrudován a ve vrstvách nanášen. Při použití struny obsahující kov s pojivem je pojivo tepelně odstraněno a kov sintrován (spečen). Metody: FDM, FFF.

### b) Nanášení tryskáním (Material Jetting):

Materiál (fotosenzitivní polymer, vosk, kapalina s kovem) je ve vrstvách nanášen ve formě kapiček. Fotosenzitivní polymer je navíc po každé vrstvě vytvrzován UV zářením. V případě kapaliny s kovovými nanočásticemi se kapalina vysokou teplotou odpaří, tak aby zůstal samotný kov. Metody: MJ, NPJ, DOD.

### c) Tryskání pojiva (Binder Jetting):

Materiál ve formě prášku (kov, písek) je po vrstvách spojován tekutým pojivem, které je nanáшено tryskami. K dosažení plné struktury je výrobek izostaticky lisován za tepla (HIP). Metody: BJ.

### d) Laminace plátů (Sheet Lamination):

Pláty materiálu (polymer, papír, kompozit) jsou spojovány pomocí tepla a tlaku aktivovaného přilnavého nátěru a poté jsou kontury výrobku vyřezány laserem. Metody: LOM.

### e) Fotopolymerace (Vat Photo-polymerization)

Fotosenzitivní kapalná pryskyřice je po vrstvách vytvrzována UV laserem. Kapalina může být plněna částicemi kovu nebo polymeru. Metody: SLA, DLP.

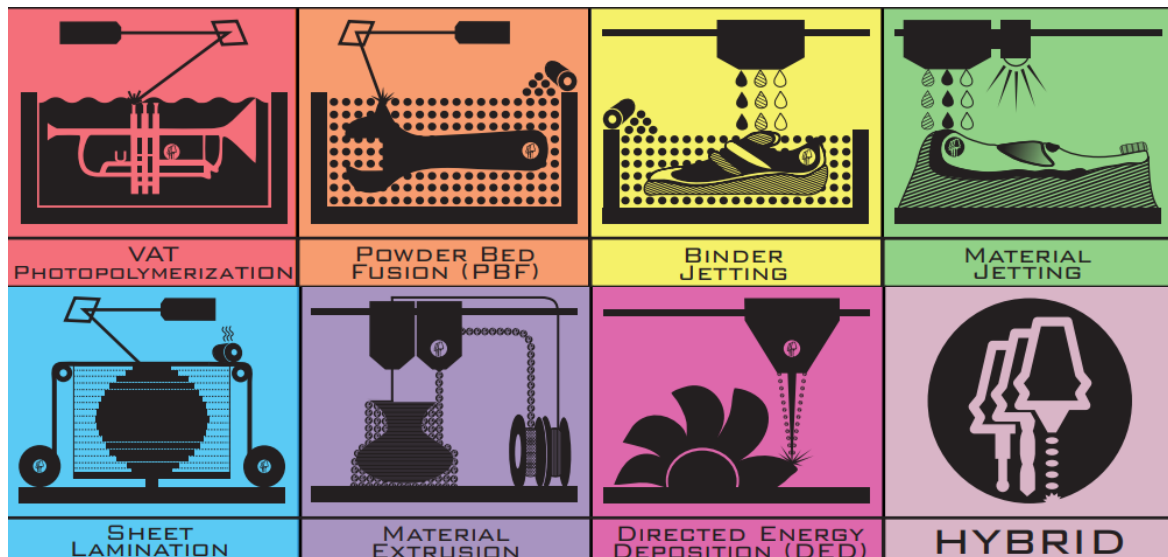
### f) Fúze práškové vrstvy (Powder Bed Fusion – PBF)

Materiál (kov, polymer, keramika) ve formě prášku, který je umístěn v loži je po vrstvách spojován pomocí tepelné energie z laserového nebo elektronového paprsku. Prášek je spojován tavením nebo sintrováním. Metody: MJF, SLS, SLM/DMLS, EBM.



**g) Přímé energetické nanášení (Directed Energy Deposition – DED):**

- Kov ve formě prášku nebo drátu je nanášecí tryskou přiveden do místa soustředěné tepelné energie, kde je nataven a poté spojen. Zdroj tepelné energie může být laserový paprsek, elektronový paprsek, plazmový nebo elektrický oblouk.
- Metody: LENS, EBAM, LMD

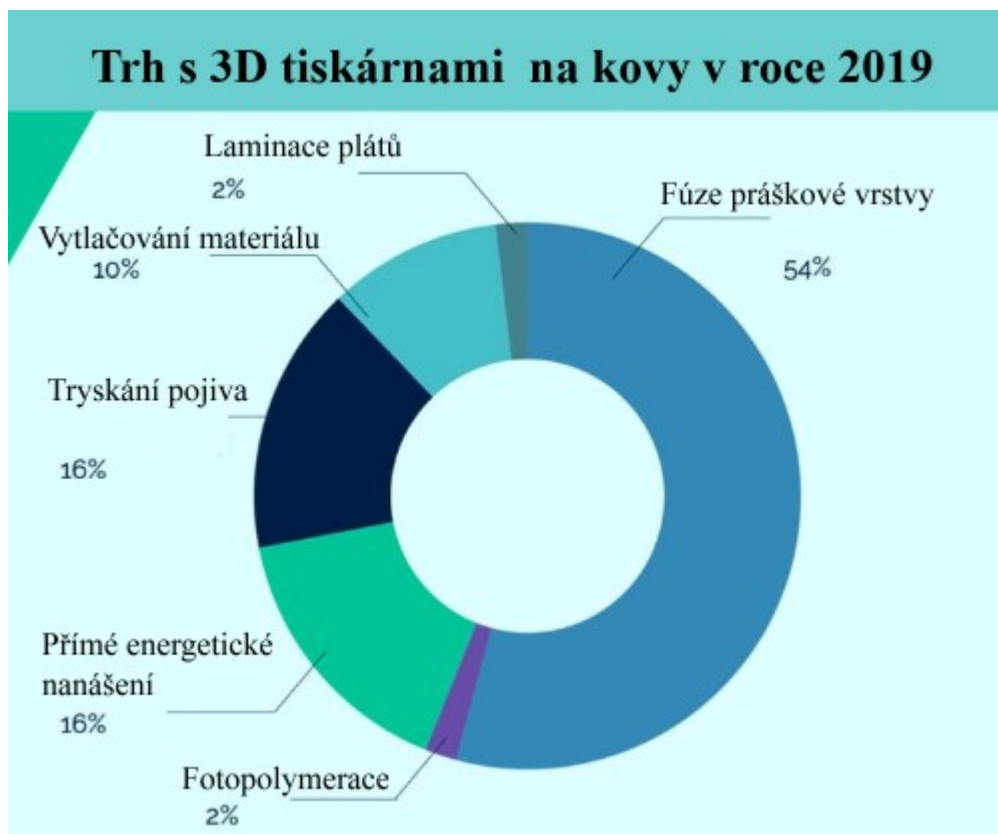
Obr. 3 Rozdělení aditivní výroby dle ISO/ASTM 52900:2015<sup>8</sup>**1.3 Aditivní výroba kovů**

V současnosti roste počet AM, které jsou nějakým způsobem schopny pracovat s kovy. Stále však převládá počet firem zaměřených na polymery, díky jednoduchosti a dostupnosti. Pro strojírenství jsou stále kovy nenahraditelným materiálem, a to i přesto, že dnes existují speciální nekovové materiály, které některými svými vlastnostmi kovy převyšují. Většina metod mohla ve svých počátcích zpracovávat pouze určité materiály, a to zejména polymery. Nyní již i tyto metody rozšiřují škálu použitelných materiálů na kovy a zvětšují tak možnosti výroby kovových dílců. Firmy musejí mnohem rychleji reagovat na zvyšující se konkurenci. Technologie tak mají tendenci se rychle zlepšovat, zlevňovat a rozšiřovat se do většího množství podniků.

Z průzkumu trhu, jehož výsledky jsou na Obr. 4 je patrné, že v roce 2019 byla pro výrobu kovových výrobků nejužívanější technologie Fúze práškové vrstvy, následně přímé energetické nanášení (DED) a nanášení tryskáním. Je zjevné, že poměrně vysoký podíl má také technologie vytlačování materiálu, která dnes patří mezi nejrozšířenější pro polymery. Pro přímou výrobu funkčních a plně hustých výrobků bez použití pojiv jsou nejdůležitější první dvě zmíněné technologie. Metody, které využívají pojivo jsou zpravidla dostupnější, levnější, výroba bývá rychlejší a bez použití ochranné atmosféry. Avšak je zde potřeba tepelným zpracováním odstranit pojivo a hipováním (HIP) dosáhnout plné hustoty materiálu výrobku. Technologie DED je vhodná pro renovace a rychlou tvorbu jednoduchých výrobků velkých rozměrů. Nevýhodou je horší přesnost a drsnost výrobků. Tato technologie může

být také zkombinována s CNC obráběním, taková kombinace je známá pod názvem hybridní kovový tisk (HMP). Je také možnost vytvářet vrstvy odlišných materiálů, tzv. multivrstvy. Naproti tomu technologie fúze práškové vrstvy je vhodná pro výrobu menších a složitějších výrobků s vyšší přesností. Pod tuto technologii spadá metoda SLS, která je využívána pro tisk výrobků z polymerů, a především metoda SLM, které se věnuje nadcházející kapitola.

8, 9



Obr. 4 Zastoupení technologií AM pro kovy na trhu v roce 2019<sup>9</sup>

## 2 Metoda SLM

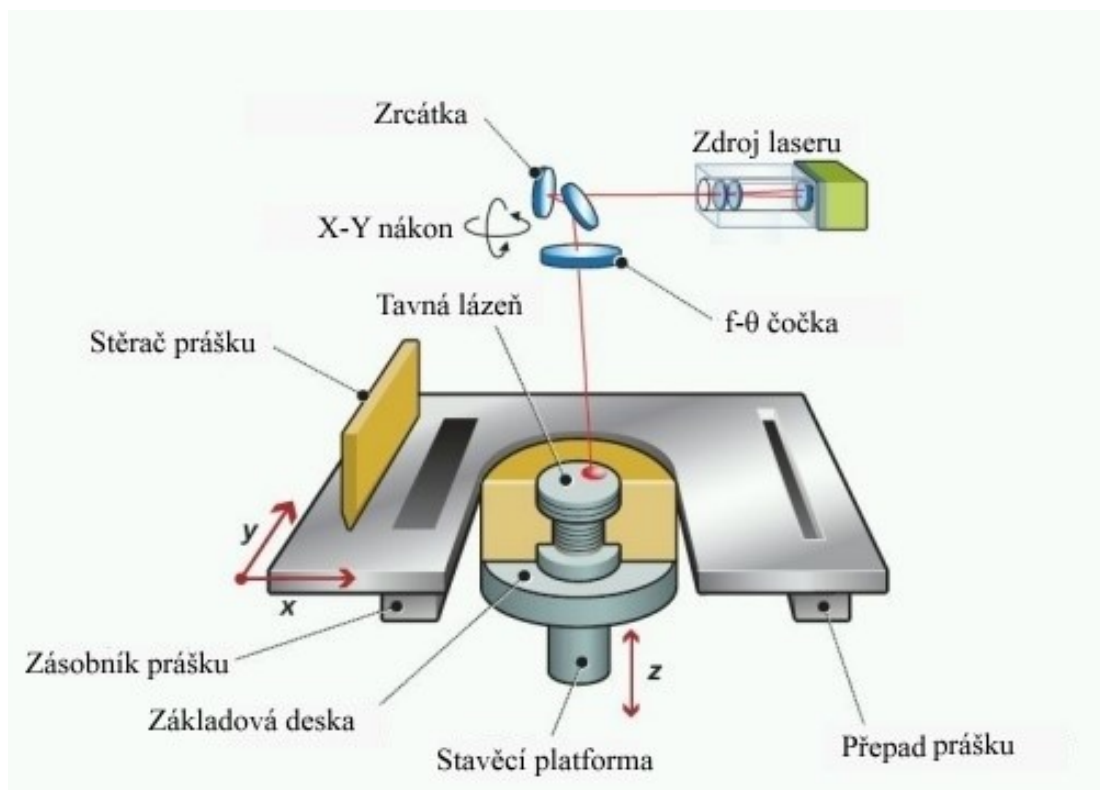
### 2.1 Úvod do metody SLM

Tato metoda spadá pod technologii fúze práškové vrstvy. Všechny metody této technologie pracují na podobné bázi, viz Obr. 5. Metoda SLM je však určena výhradně pro výrobu výrobků z kovů a slitin s nízkou porozitou, tedy vysokou strukturní hustotou, a to více než 99 %. Na rozdíl od metody SLS zde totiž dochází k úplnému tavení (ohřev nad teplotu tavení materiálu) prášku včetně protavení do předchozí vrstvy, nikoli tak pouze k sintrování (ohřev pod teplotu tání materiálu). Metoda SLS je produktivnější a nevyžaduje tvorbu podpůrných struktur. V současnosti je tato metoda rozvinuta a využívána výhradně pro polymery. Metodě SLM může konkurovat zatím méně rozšířená metoda Tavení elektronovým paprskem (EBM), u které probíhá výroba ve vakuové komoře pomocí elektronového paprsku.<sup>1, 2</sup>

U těchto metod musí být nejprve v podpůrném programu stroje rozdělen 3D CAD model v STL formátu na 2D vrstvy. Navrhují se také dočasné podpůrné struktury, které mají za úkol zafixovat výrobek na stavěcí desce stroje, odvádět teplo a případně zamezit deformacím. Topologickou optimalizací s využitím bionických konstrukcí lze při zachování pevnosti a vyrobitelnosti snížit hmotnost a nutnost dočasných podpor na minimum. Definují se také parametry procesu, jako je výkon laseru, šrafovací vzdálenost, skenovací rychlost, tloušťka nanášené vrstvy a skenovací strategie. Vlivem nerovnoměrného teplotního gradientu a absorptivity materiálů mohou nastat problémy jako jsou zbytková napětí, póry, vměstky, trhliny, odlegování a tvorba kulových částic (balling efekt). Právě optimalizací proměnných parametrů pro konkrétní stroj a materiál je možno ovlivnit četnost a velikost možných vad vzniklých při výrobním procesu.<sup>10, 11</sup>

Celý proces výroby probíhá ve vzduchotěsné pracovní komoře, ze které je nejprve odsán vzduch a poté je do ní přiveden inertní plyn argon, který vytěsňuje kyslík, případně chrání tavnou lázeň s reaktivními kovy, jako je například titan. U některých zařízení může inertní plyn plynule proudit i během výroby, a odvádět tak kyslík a další produkty vzniklé tavením prášku k recyklaci do filtračního zařízení. Samotná výroba spočívá v nanesení tenké vrstvy prášku na stavěcí desku lože stroje. Vrstva odpovídá jednomu 2D řezu, který vznikl rozdělením 3D CAD modelu do vrstev. Lože stroje bývá většinou předeřháto a je vyrobeno z podobného materiálu jako výrobek. Laserový paprsek poté selektivně taví kovový prášek pouze v oblastech průniku dané roviny s modelem výrobku. Skenování každé plochy laserem probíhá dle nastavených procesních parametrů a po předem definované skenovací strategii, která je dána vektory. Laser má vysokou koherenci a mono-chromaticnost, tudíž je schopen soustředit velké množství energie na velmi malou plochu. Plně roztavený prášek následně díky rychlému odvodu tepla ztuhne do celistvé struktury a takto je vytvořena jedna vrstva budoucího výrobku. V ideálním případě je dosaženo jemnozrnné struktury. Po této fázi se pohyblivé lože stroje sníží o výšku další vrstvy, znovu se nanese vrstva prášku a

proces se opakuje, dokud není výrobek zcela hotov. Po dokončení je vysán přebytečný prášek, který je možno přesít a opětovně použít. Na závěr se ze stroje vyjme základní deska s výrobky, které jsou od desky separovány pásovou pilou nebo elektroerozivním obráběním drátem (EDM). Základní deska s pozůstatky podpor se zarovná do roviny frézováním a broušením. Výrobek pak může být tepelně zpracován, otryskán, omílán, obráběn, leštěn nebo svařován. Drsnost povrchu, rozměrová i geometrická přesnost výrobku v současnosti neodpovídá požadavkům na funkční plochy, proto musejí být tyto plochy vždy dodatečně obráběny. Při dobře zvolených parametrech výrobního procesu dosahují mechanické vlastnosti materiálu výrobku téměř totožných hodnot jako u výrobku ze stejného materiálu zpracovaného konvenčními technologiemi.<sup>4, 11, 12</sup>



Obr. 5 Schéma metody SLM<sup>13</sup>

## 2.2 Parametry procesu

Procesní parametry mají zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti výrobku, kvalitu povrchu, přesnost a také čas jeho výroby. Mnohé parametry mají mezi sebou závislost. Procesní parametry lze rozdělit na parametry skenování, stroje (laseru a prostředí) a prášku. Další dělení je pak na parametry volitelné operátorem (parametry skenování a některé parametry stroje) a pevně dané (parametry prášku a některé parametry stroje). Veškeré procesní parametry jsou v Tab. 1 a graficky jsou parametry procesu znázorněny na Obr. 6 a parametry při tvorbě stopy na Obr. 7. Intenzita laserového paprsku je vyjádřena výkonem laseru a průměrem laserového paprsku, viz vztah (2.1). Pro výpočet skenovací rychlosti v případě pulzního režimu laseru se využívá rovnice (2.2), kde vstupuje také doba trvání pulzu. Objemová hustota vyzářené energie je definována dle rovnice (2.3) a zohledňuje interakci běžně volitelných procesních parametrů stroje.<sup>14, 15</sup>

**Intenzita laserového paprsku:**

$$I_v = \frac{4000 \cdot P}{\pi \cdot d^2} \text{ (W} \cdot \text{mm}^{-2}\text{)} \quad (2.1)$$

Kde:

$P$  = výkon laseru (W)

$d$  = průměr laserového paprsku ( $\mu\text{m}$ )

**Rychlost skenování:**

$$v = \frac{60}{ET + 12} \cdot 10^3 \text{ (mm} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \quad (2.2)$$

Kde:

$ET$  = doba trvání pulsu ( $\mu\text{s}$ )

**Objemová hustota vyzářené energie:**

$$E_v = \frac{10^6 \cdot P}{v \cdot h_d \cdot t} \text{ (J} \cdot \text{mm}^{-3}\text{)} \quad (2.3)$$

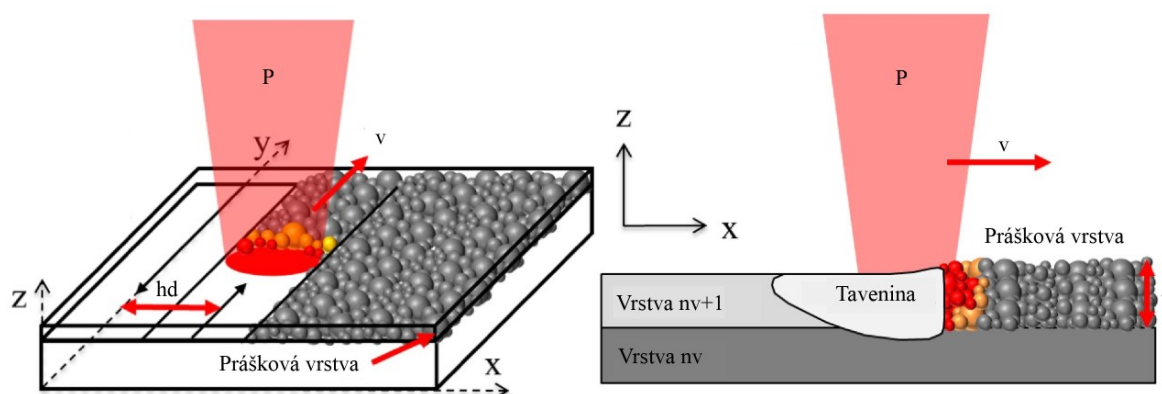
Kde:

$h_d$  = šrafovací vzdálenost ( $\mu\text{m}$ )

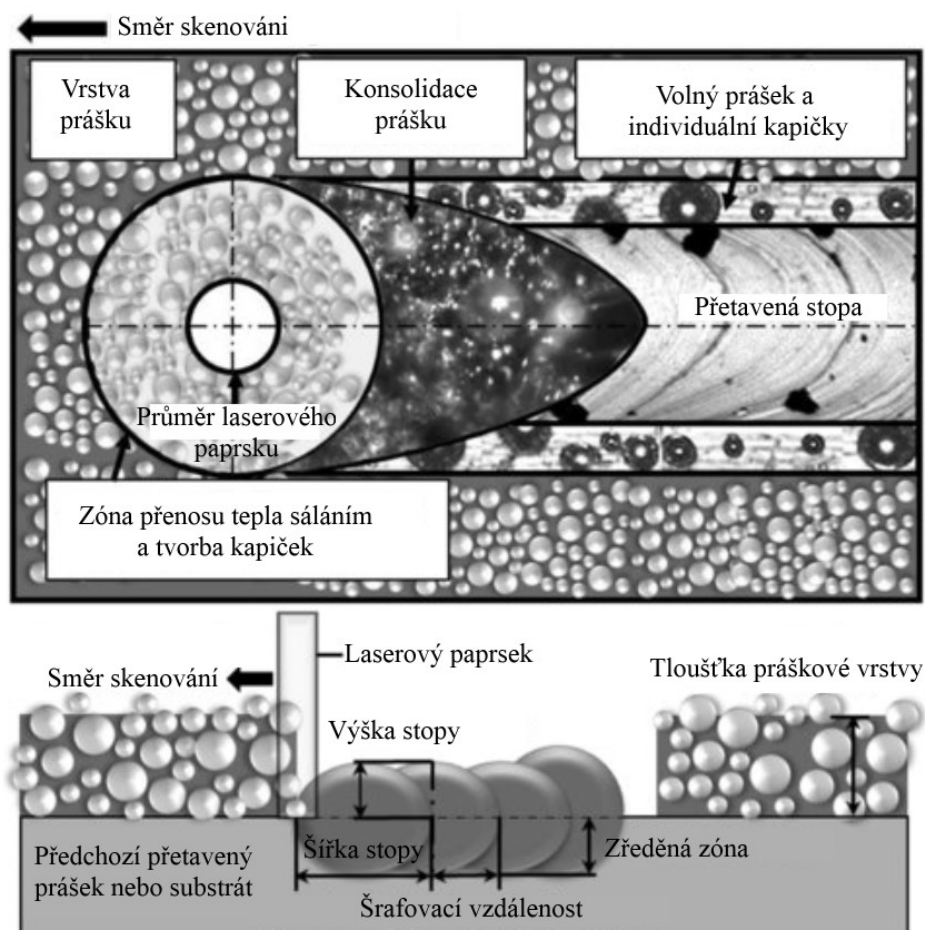
$t$  = tloušťka vrstvy ( $\mu\text{m}$ )

Tab. 1 Parametry procesu

Parametr	Značka	Jednotka	Popis
<b>Volitelné parametry skenování</b>			
Rychlost skenování	v	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Rychlost pohybu laserového paprsku po práškovém loži
Šrafovací vzdálenost	$h_d$	$\mu\text{m}$	Vzdálenost mezi dvěma vektory
Úhel pootočení	$\varphi$	°	Úhel pootočení mezi po sobě jdoucími vrstvami
Skenovací posunutí	$X_1, Y_1$	$\mu\text{m}$	Posun skenovací stopy mezi dvěma po sobě jdoucími vrstvami ve směru X a Y
Skenovací strategie	-	-	Způsob vyplnění 2D vrstvy vektory
Orientace výrobku	-	-	Orientace výrobků na základní desce
<b>Volitelné parametry stroje (laseru a prostředí)</b>			
Výkon laseru	P	W	Práce vykonaná laserem za jednotku času
Doba trvání pulzu	ET	$\mu\text{s}$	Doba expozice laser. paprsku na bod
Vzdálenost mezi pulzy	s	$\mu\text{m}$	Vzdálenost mezi dvěma body pulzů paprsku
Tloušťka vrstvy	t	$\mu\text{m}$	Tloušťka 2D vrstvy prášku se volí dle velikosti prášku
Předehřev substrátu	T	°C	Teplota předehřevu substrátu
Tlak v komoře	$p_k$	kPa	Závisí na množství inertního plynu
Obsah kyslíku	-	%	Závisí na čistotě inertního plynu
<b>Pevně dané parametry stroje (laseru a prostředí)</b>			
Průměr paprsku laseru	d	$\mu\text{m}$	Průměr paprsku laseru v bodě fokusace
Vlnová délka laseru	$\lambda_l$	nm	Určuje míru absorpce energie laseru do určitého práškového materiálu
Režim laseru	-	-	Pulzní nebo kontinuální
Inertní plyn	-	-	Argon nebo dusík

Obr. 6 Parametry procesu SLM<sup>16</sup>



Obr. 7: Parametry při vytváření stopy<sup>17</sup>

### 2.2.1 Skenovací strategie

Skenovací strategie je způsob, jakým laser vyplňuje jednotlivé vrstvy skenovacími vektory. Zvolenou strategií zejména vnitřních šraf lze zásadně ovlivnit dobu výroby a vlastnosti výrobku, zejména pak zbytková napětí, ale také mikrostrukturu. Rozlišují se vektorové dráhy pro spojovací kontury, obvodové kontury a vnitřní šrafy, což znázorňuje Obr. 8. Obvodová kontura zlepšuje kvalitu povrchu výrobku a spojovací kontura zlepšuje poréznost mezi vnitřními šrafy a obvodovou konturou. Často se využívá přídavných kontur, které se zhotovují v různém pořadí a mají předem definovaná odsazení. Pokud laser pracuje pulzním režimem, tak v každém bodě jeho působení po daný čas vytváří z prášku tavnou lázeň, která má podobu 3D Gaussovy křivky. Míra překrytí tavných lázní má být 1/3 jejich průměru k dosažení nízké porozity. Z toho pravidla je poté odvozena vzdálenost mezi pulzy (Obr. 9), šrafovací vzdálenost (Obr. 10) a odsazení mezi konturami (Obr. 11). Nejprve bývá vytvořena spojovací kontura, která tvoří vazbu mezi obvodovou konturou a vnitřní šrafy. V dalším kroku se zhotovují vnitřní šrafy, kdy jednotlivé dráhy jsou od sebe vzdáleny o šrafovací vzdálenost  $h_d$ , což je znázorněno na Obr. 10. Šrafovací vzdálenost musí být menší, než šířka vyhotovené dráhy (návaru) a větší než průměr laserového paprsku. Větší šrafovací vzdálenost a vzdálenost mezi výboji laseru má za následek více porosity, menší vzdálenost zase méně porosity, ale delší čas výroby a více vneseného tepla do součásti. Na Obr. 12 jsou

nejpoužívanější skenovací strategie v procesu SLM. Nakonec je vyhotovena obvodová kontura k vytvoření konečného obvodu vrstvy. Střed dráhy laseru musí být od skutečného obvodu výrobku kompenzován o hodnotu poloviny šířky vytvořené dráhy (návaru), což je znázorněno na Obr. 8. Tímto způsobem je vytvořena jedna vrstva. Další vrstva má vnitřní šrafy pootočeny oproti předešlé vrstvě o úhel  $\alpha$  z důvodu snížení anizotropie a zlepšení porozity v dané rovině. Na to poukazuje Obr. 13, kde je pootočení demonstrováno na skenovací strategii Stripes. Vhodný úhel je  $67^\circ$ , jelikož totožně orientovaná vrstva vznikne až po 180 - ti řezech. Skenování se provádí proti proudu ochranného plynu. Pro následující vrstvu je možné aplikovat i odsazení skenovacích vektorů ve směrech X, Y, čímž dojde i k posunutí referenčního bodu otáčení a dalšímu zlepšení porozity. Jednotlivé vrstvy musí být vzájemně protaveny, aby došlo k vytvoření homogenní struktury. Odlišné podmínky se pak z důvodu zlepšení kvality povrchu aplikují na spodní plochy přesahů výrobku a na horní plochy výrobku, což je patrné na Obr. 14.<sup>14, 18, 19, 20</sup>

#### a) Meander (záhyb)

Vektory jsou mezi sebou paralelní a skenování probíhá kontinuálně. Je to rychlá a efektivní strategie vhodná pro málo rozměrné výrobky v rovině X, Y. Nevýhodou je nerovnoměrná distribuce tepla, jelikož se mění délka vektorů a s tím i čas pro odvod tepla. V rozích je vektor krátký, díky tomu je zde rychlejší sled skenování i kratší čas k vychladnutí než ve středu řezu výrobkem. Lze předpokládat vyšší zbytková napětí ve výrobku.<sup>14, 18</sup>

#### b) Stripes (proužek)

K vyplnění plochy řezu se používají krátké pruhy, které jsou skenovány kontinuálně po jednotlivých sloupcích. Délka pruhů se příliš nemění, což umožňuje konstantní čas skenování a tím také rovnoměrné rozložení tepla. Pro snížení porozity se používá mezi sloupci záporný offset. Jedná se pomalejší strategii než Meander, ale s nižším vneseným zbytkovým pnutím.<sup>14, 18</sup>

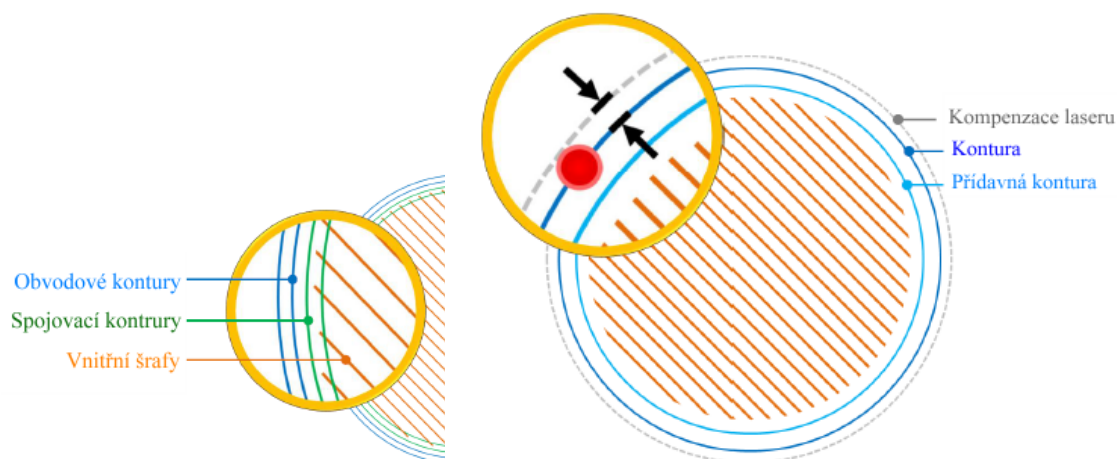
#### c) Chessboard/Island (šachovnice/ostrov)

V tomto případě je plocha rozdělena na jednotlivá čtvercová pole, která jsou složena z pruhů. Sousedící pole jsou mezi sebou, otočeny o  $90^\circ$ . Nejprve jsou skenovány totožně orientovaná pole. Pro snížení porozity je potřeba zvolit mezi poli vhodné odsazení. Tato strategie byla vyvinuta speciálně pro snížení zbytkových napětí. Jedná se velice málo produktivní metodu.<sup>14, 18</sup>

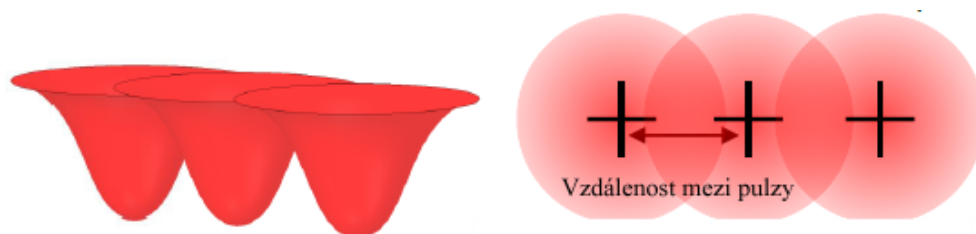
#### d) Total Fill (celá výplň)

Tato strategie je používána pouze pro tvorbu dočasných podpor, které mají velmi malý průřez. Pro tento případ by byla jakákoliv jiná skenovací strategie neefektivní. K vyplnění plochy nejsou použity výplňové šrafy, ale pouze přídavné obvodové kontury.<sup>14, 18</sup>

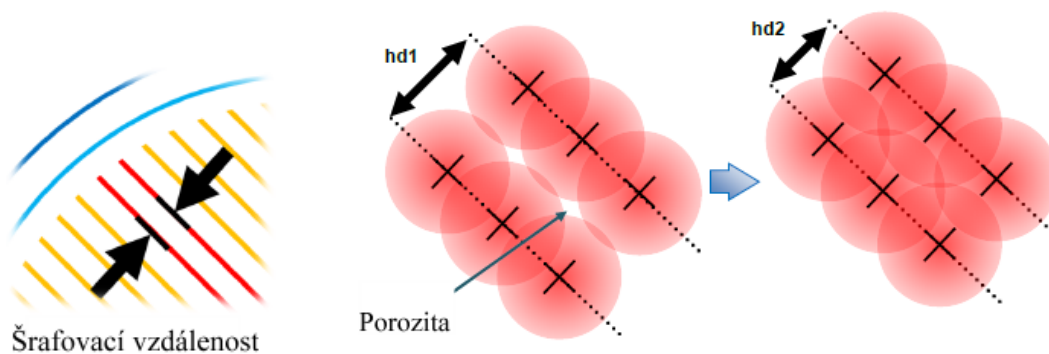




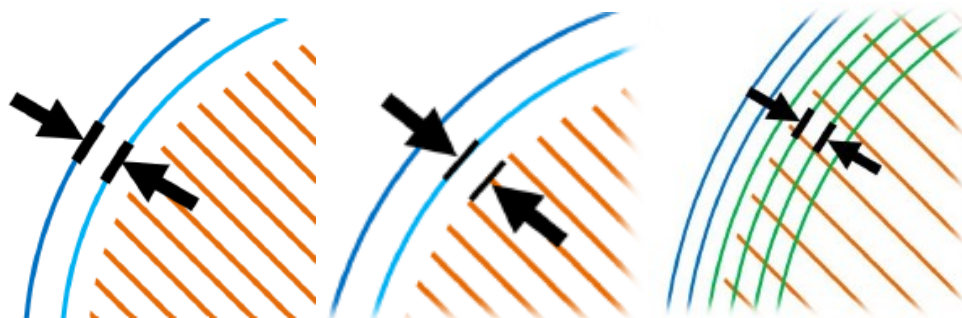
Obr. 8 Základní vektorové dráhy skenování: obvodové kontury (Borders), spojovací kontury (Fill Contours), vnitřní šrafy (Fill Hatch), kompenzace dráhy laseru od skutečného okraje výrobku (STL Boundary) <sup>18</sup>



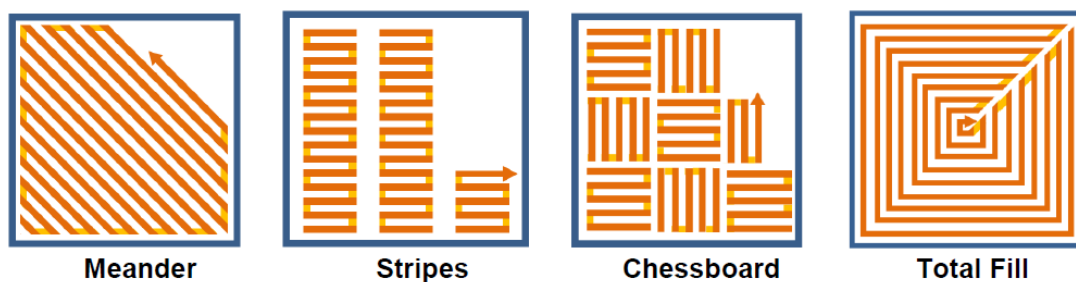
Obr. 9 Jednotlivé výboje laseru a vzdálenost mezi pulzy (Point Distance) <sup>18</sup>



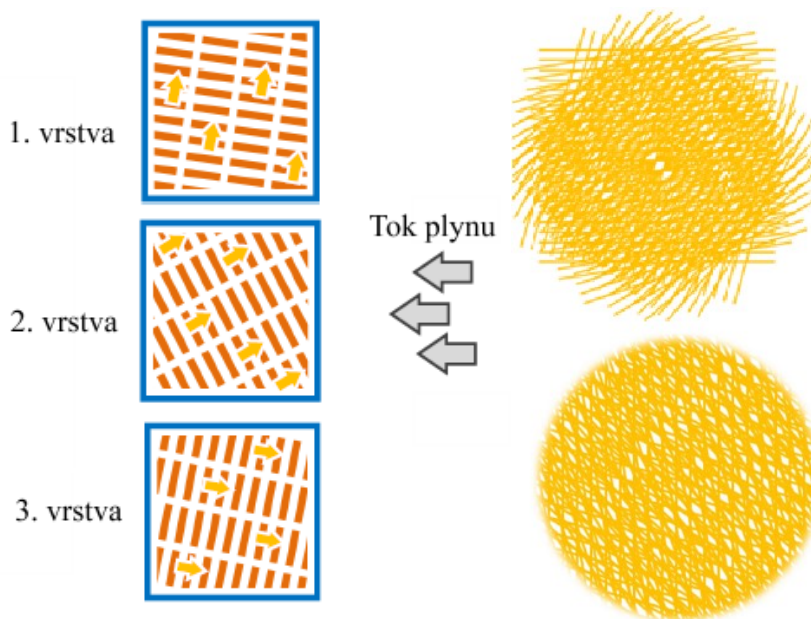
Obr. 10 Vliv šrafovací vzdálenosti  $h_d$  (Hatch Distance) na porozitu <sup>18</sup>



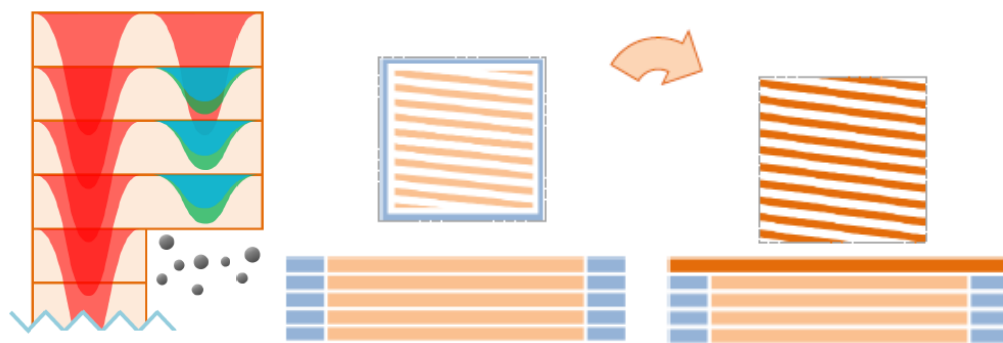
Obr. 11 Vzdálenost mezi obvodovými konturami, odsazení obvodové kontury od vnitřních šraf, vzdálenost mezi spojovacími konturami <sup>18</sup>



Obr. 12 Základní skenovací strategie SLM (žlutý vektor značí vypnutý laser) <sup>18</sup>



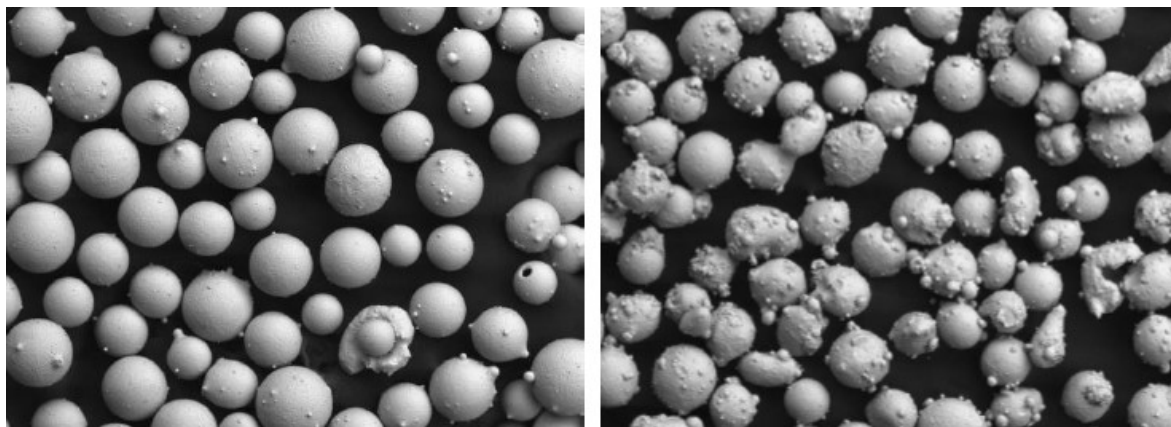
Obr. 13 Pootočení jednotlivých vrstev strategie Stripes a význam ref. bodu otáčení <sup>18</sup>



Obr. 14 Protavení vrstev (červená), přetavení vrstev přesahu výrobku (modrá) a přetavení (Remelting) horního povrchu výrobku <sup>18</sup>

## 2.3 Parametry práškového kovu

Interakce prášku s laserem je ovlivněna vlnovou délkou, hustotou energie, dobou expozice prášku zářením, termodynamickými jevy a fyzikálními vlastnostmi prášku. Na morfologii prášku (Obr. 15) závisí reflektivita (odrazivost), absorptivita a rozptyl záření. Absorptivita kovů roste a zároveň reflektivita klesá s klesající vlnovou délkou laseru. Přenos tepla v práškovém loži probíhá tak, že teplo je odváděno do prostředí prouděním, vedením a zářením. Přenos tepla je závislý na tepelné vodivosti, tepelné difuzi, tepelné kapacitě, emisivitě a koeficientu konvekce. <sup>2</sup>



Obr. 15 Rozdíl v morfologii prášku vyrobeného plazmovou atomizací (vlevo) a plynovou atomizací (vpravo) <sup>15</sup>

## 3 Zbytková napětí a deformace v SLM

### 3.1 Úvod do problematiky

Zbytková napětí vznikají u kovových výrobků vlivem nehomogenní plastické nebo elasticko-plastické deformace a zůstávají v tělese i po odstranění jejich příčiny. K napjatostem může dojít působením mechanických (silové působení nástroje, montážní napětí), chemických (adsorpce plynů a cizích částic), tepelných procesů (nerovnoměrný ohřev a ochlazování). Může také docházet ke strukturním napětím díky fázovým transformacím nebo k vylučování jiných strukturních složek, které mají rozdílný objem nebo odlišné fyzikální a mechanické vlastnosti. Strukturní změny jsou obvykle způsobeny zvýšenou teplotou nebo deformací. Napětí tepelného původu je spojeno s výskytem teplotního pole (homogenní, nehomogenní). V případě homogenního teplotního pole vzniká napjatost pouze pokud je zamezeno součásti teplotně dilatovat. Nehomogenní teplotní pole obsahuje v ploše nebo v objemu tělesa teplotní gradienty a k napjatostem dochází i při umožnění součásti volně dilatovat.<sup>21, 22</sup>

Jestliže se v tělese působící napětí nachází pouze v elastické oblasti, dojde po odstranění zdroje tohoto napětí k jeho vymizení, jedná se tak pouze o dočasné napětí. Pokud však v tělese dojde vlivem zdroje napětí ke vzniku pružně plastického stavu, tak po odstranění zdroje napětí zůstanou uvnitř tělesa zbytková napětí. Výslednice vnitřních sil v daném průřezu tělesa je rovna nule. Velikost zbytkových napětí je ovlivněna zejména velikostí působícího mechanického zatížení, strukturními změnami, množstvím a rozložením dodaného tepla. Velký vliv má také rychlost ohřevu a ochlazování na danou teplotu a doba výdrže na dané teplotě.<sup>21, 22</sup>

Zbytková napětí způsobují zhoršení mechanických vlastností, jako je například snížení meze kluzu a únavy. V provozu pak může za vyšších teplot a namáhání dojít k relaxaci zbytkových napětí. Uvolnění zbytkových napětí vyvolává deformace, tedy geometrické a rozměrové změny výrobku. Zbytková napětí mohou být i užitečná, a to například v případě vnášení tlakových napětí do povrchu součásti působením plastické deformace dopadajících těles na povrch součástí. Tlaková napětí brání na rozdíl od tahových šíření trhlin.<sup>21, 22</sup>

## 3.2 Dělení zbytkových napětí

V případě polykrystalických materiálů se zbytková napětí dělí dle velikosti objemů (Obr. 16), ve kterých se napětí nemění, co se velikosti a směru týče. V případě kovových materiálů jsou nejvýznamnější napětí I. druhu. Výsledné zbytkové napětí v daném bodě tělesa je vždy dáno superpozicí všech tří níže uvedených druhů.<sup>21</sup>

### I. druhu $\sigma_I$ (Makroskopická)

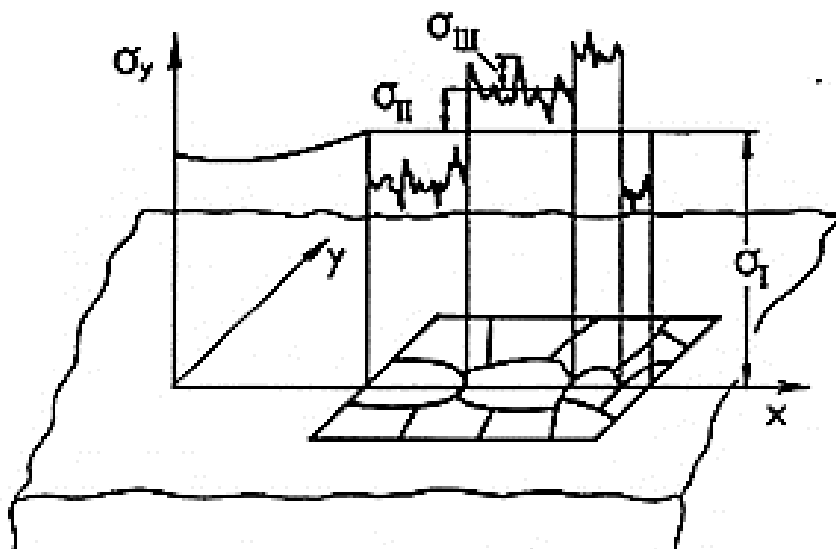
Jsou homogenní v makroskopické oblasti materiálu, což je tenká oblast zasahující do více zrn materiálu. V případě měření destruktivními metodami dochází k narušení rovnovážného stavu napětí v tělese, což se projeví trvalou deformací, tedy změnou rozměrů tělesa. Zbytková napětí I. druhu jsou střední hodnotou zbytkových napětí působících ve více zrnech. Jsou způsobena danou výrobní technologií a mají určitý směr související s geometrickým tvarem tělesa.<sup>22</sup>

### II. druhu $\sigma_{II}$ (Mikroskopická)

Jsou homogenní v oblastech o velikostech zrn materiálu. Při porušení rovnovážného stavu nemusí dojít ke změně rozměrů.<sup>22</sup>

### III. druhu $\sigma_{III}$ (Submikroskopická)

Jsou nehomogenní i v oblastech, jenž mají velikost meziatomových vzdáleností. Ke změnám rozměrů v tomto případě nikdy nedochází. Jedná se o strukturní poruchy krystalové mřížky.<sup>22</sup>



Obr. 16 Druhy zbytkových napětí dle objemu působení<sup>23</sup>

### 3.3 Mechanismy tvorby a dopady zbytkových napětí

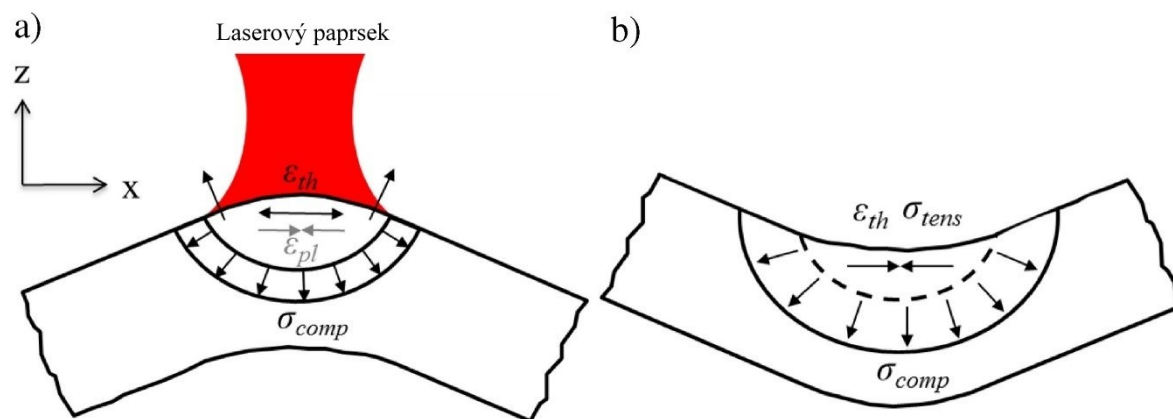
Proces SLM lze přirovnat k fúznímu svařování laserem, kdy dochází k lokální expozici materiálu vysokou tepelnou energií laseru. Celý proces doprovází tepelná napětí jako reakce na změnu teploty. Tepelná napětí vznikají z teplotního gradientu (TGM) nebo vlivem chladnutí roztavených horních vrstev materiálu. Tavná lázeň nevykazuje žádná napětí. TGM popisuje napětí při tvorbě jedné stopy (návaru), zatímco ochlazovací mechanismus popisuje chování zcela roztavené práškové vrstvy.<sup>24, 25</sup>

Primárním mechanismem vzniku zbytkových napětí je TGM, který je zachycen na Obr. 17. Při rychlém ohřevu horního povrchu laserovým paprskem a nízkému odvodu tepla dochází ke vzniku strmých teplotních gradientů. Expanze ohřáté horní vrstvy je omezeno spodní podkladovou vrstvou, proto se těsně pod nataveným práškovým ložem indukují tlaková napětí. Jestliže je vzniklé napětí vyšší než mez kluzu materiálu, dojde k plastické deformaci horní vrstvy směrem od laserového paprsku. Jakmile začne docházet k chladnutí, tlaková napětí se změní na tahová napětí vedoucí k prohnutí horní vrstvy opačným směrem, tedy k laserovému paprsku. V praxi však díky pevnému spojení výrobku se základovou deskou nedochází k deformacím, jak je blíže popsáno v následujícím odstavci.<sup>16, 24, 25</sup>

Aby při výrobě nedocházelo k deformacím a pohybům výrobku, je výrobek se stavěcí deskou pevně spojen pomocí dočasných podpor. To je jedna z odlišností od metody SLS, kde výroba probíhá bez podpor a výrobek se tak může volně deformovat. Díky pevné fixaci výrobku se v něm, ale koncentrují zbytková napětí, která mohou po překročení meze pevnosti materiálu zapříčinit odtržení od podpor, delaminaci vrstev nebo vznik trhlin ve výrobku. Trhliny také často vznikají v místech změn velikosti průřezů výrobku. Vznik trhlin může být eliminován použitím pulzního režimu laseru. Pokud se výrobek od podpor odtrhne dojde k uvolnění napětí ve výrobku a k jeho trvalým deformacím, tedy k jeho konvexnímu prohnutí. Deformovaná součást pak může znemožnit liště rozprostřít další vrstvu prášku.<sup>19</sup>

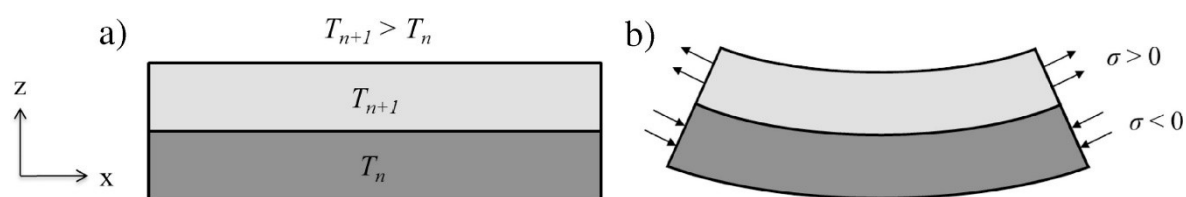
V případě sekundárního ochlazovacího mechanismu (Obr. 18) dochází při chladnutí teplejších horních vrstev k jejich smrštění díky teplotní kontrakci, avšak již ztuhlá podkladová vrstva klade odpor, a tak nedochází k deformacím. Následkem je vznik tahových napětí v horní vrstvě a tlakových napětí v předešlé vrstvě.<sup>16, 24, 25</sup>





Obr. 17 Schéma mechanismu zbytkových napětí vlivem teplotního gradientu při:

a) ohřevu, b) ochlazování ( $\epsilon_{pl}$  = plastická a  $\epsilon_{th}$  = tepelná deformace,  $\sigma_{tens}$  = tahová a  $\sigma_{comp}$  = tlaková napětí) <sup>16</sup>



Obr. 18 Schéma ochlazujícího mechanismu při vzniku zbytkových napětí při a) ohřevu b) chlazení <sup>16</sup>

### 3.4 Potlačení tvorby a redukce zbytkových napětí

Potlačení vzniku zbytkových napětí je účinné snížením teplotních gradientů. Tohoto je možné dosáhnout vhodnou skenovací strategií, předehřevem základové desky, žiháním a optimalizací skenovacích parametrů. Všemi zmíněnými proměnnými se již v minulosti zabývalo několik publikací a lze tak vyvodit všeobecná doporučení. Výzkum všech vlivů a jejich interakce je však stále nedostatečný a je potřeba v něm nadále pokračovat. Optimalizace skenovacích parametrů spočívající v použití vysokého výkonu laseru, nízké skenovací rychlosti a tenčí vrstvy. Lze tedy říci, že výhodnější je vyšší objemová hustota vyzářená energie. Upřednostněním takovýchto parametrů lze zároveň dosáhnout vysoké hustoty, tedy nízké porozity výrobku. Nicméně vliv šrafovací vzdálenosti, případně režimu laseru není zatím zcela prozkoumán. V případě některých materiálů je po výrobě výhodné i tepelné zpracování (žihání), kdy se výrobek stále upevněný na základové desce v peci tepelně zpracovává. Nevhodně nastavené procesní parametry mohou vést k tvorbě nežádoucích defektů i během stavby, viz Obr. 19. <sup>20, 26, 27, 28</sup>

Co se týče skenovací strategie, z odborných publikací plyne, že největší složka zbytkového napětí je rovnoběžná s vektorem skenování. Zároveň s délkou vektoru roste i velikost vnitřního napětí. Kratší doba mezi nanášením jednotlivých stop navíc zapříčiní, že následná stopa je kladena vedle ještě nevychlazené stopy, což vede k jejímu předehřevu a snížení teplotních gradientů. Nejvýhodnější jsou tedy skenovací strategie s krátkými stejně dlouhými vektory jako je Stripes nebo Chessboard. Velice vhodné jsou ostrovy, kdy dochází

ke snížení zbytkových napětí vlivem skenování převážně jejich hranic, které jsou bez napětí. Skenování navíc probíhá na přeskáčku nikoli postupně. Menší velikost ostrova však nemusí nutně znamenat nižší zbytková napětí, jelikož zde má vliv více faktorů.<sup>24, 25, 29, 30</sup>



Obr. 19 Održení výrobků od podpor během stavby<sup>15</sup>

### 3.5 Měření zbytkových napětí

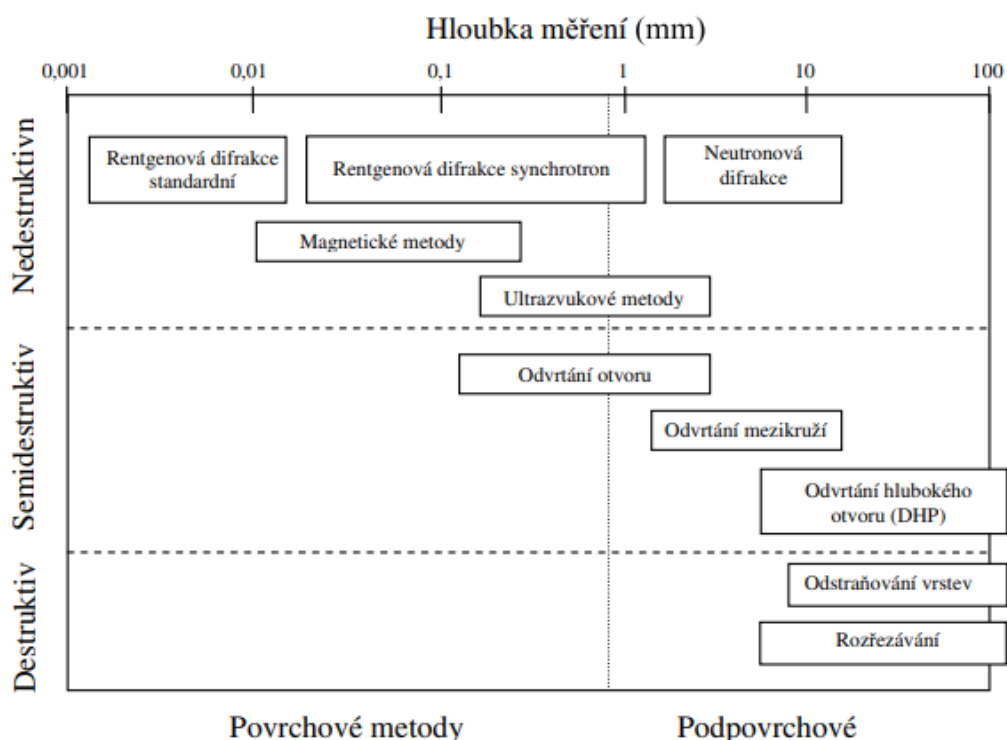
K měření zbytkových napětí je možno využít různé metody, které mohou být destruktivní, nedestruktivní, případně polo-destruktivní. Z hlediska hloubky měření se pak metody dělí na povrchové a podpovrchové. Jednotlivé metody se také liší přesností, dostupností a náročností. Přehled typických metod rozříděných dle hloubky měření a míry porušení materiálu je shrnut na Obr. 20.<sup>25, 31</sup>

Princip destruktivních metod (tenzometrie) spočívá ve vyvolání deformace po uvolnění zbytkových napětí díky trvalému porušení materiálu. Měří se tedy deformace jako odezva vnitřních napětí, a to pomocí tenzometrů, souřadnicový měřicí přístroj (CCM), 3D skener nebo mikroskop. Tenzometr je odporový senzor, u něhož je změna elektrického odporu závislá na změně jeho rozměrů a na změně okolní teploty. Mohou být kovové nebo polovodičové. Z naměřené deformace pak lze například numerickým výpočtem pomocí metody konečných prvků (MKP) stanovit kalibrační koeficienty představující převodník mezi uvolněnými deformacemi a zbytkovým napětím v materiálu. Přesnost výsledků pak závisí na množství a přesnosti vstupních dat. Jde vždy o měření makroskopických napětí. Mezi nejpoužívanější metody pro měření zbytkových napětí patří polo-destruktivní odvrtávací metoda otvoru a mezikruží. Lze tak měřit dvouosou napjatost v rovině povrchu



materiálu v různých hloubkách. Destruktivní rozřezávací metody jsou přesnější, než polodestruktivní, kde se napětí uvolňuje jen částečně.<sup>25, 31</sup>

Princip nedestruktivních metod (defektoskopie) spočívá v nalezení vztahů mezi fyzikálními nebo krystalografickými vlastnostmi materiálu a zbytkovým napětím. Dle principu měření zbytkových napětí, respektive deformací se metody dělí na mechanické, difrakční a metody využívající fyzikálních vlastností materiálu. Metody difrakční využívají krystalovou mřížku jako tenzometr, kdy se měří vzdálenost meziatomových rovin. Magnetické metody pracují s odezvou materiálu na působící střídavé magnetické pole. Ultrazvukové metody využívají vztah mezi rychlostí šíření vlny a elastickými konstantami materiálu.<sup>25, 31</sup>



Obr. 20 Přehled metod měření zbytkových napětí<sup>31</sup>

# EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

## 4 Analýza problému

### 4.1 Stanovení cílů

Na samém počátku bylo třeba stanovit primární cíl experimentální části práce. K tomuto cíli však vede snazší cesta prostřednictvím mnoha dílčích cílů. Od primárního cíle se pak odvíjí návrh celé metodiky zkoumání, pomocí které mají být dílčí cíle splněny. Jedná se prakticky o návrh celého postupu experimentu.

#### Primární cíl:

1. Zjistit jaký má vliv skenovací strategie na velikost zbytkových vnitřních napětí u vzorků vyrobených z oceli 316L metodou SLM.

#### Sekundární cíl:

1. Zjistit jaký mají vliv vybrané procesní parametry na velikost zbytkových vnitřních napětí u vzorků vyrobených z oceli 316L metodou SLM.
2. Ověřit rychlost, praktičnost, spolehlivost a ověřit relevantnost daného experimentu.

#### Dílčí cíle návrhu a realizace experimentu:

- a) Využít z teoretické části práce relevantní informace k dané problematice a z nich dále vycházet.
- b) Navrhnout skenovací strategie a dodatečné proměnné parametry a dle nich i dostatečný počet vzorků pomocí vhodně zvolené metodiky.
- c) Navrhnout vhodnou metodu měření zbytkových napětí a navrhnout zkušební vzorky.
- d) Vyrobit vzorky na zvoleném stroji a šetrně je separovat ze základní desky.
- e) Zhodnotit velikost zbytkových napětí vzorků pomocí zvolených přístrojů a softwarů.

#### Dílčí cíle zhodnocení experimentu:

- a) Vyhodnotit zjištěné hodnoty a zjistit, zda mají testované proměnné statistický význam na velikost vnitřních zbytkových napětí.
- b) Zhodnotit průběh a relevantnost celého experimentu a vést polemiku v rámci diskuze.
- c) Uvést přínos této práce do budoucna a sjednotit výsledky v rámci závěru.

## 4.2 Formulace otázek

Dle předem stanovených cílů byly formulovány experimentální otázky, které mají být v rámci této části práce zodpovězeny.

**V1:** Jaký je vliv skenovací strategie na zbytková vnitřní napětí?

**V2:** Jaký je vliv výkonu laseru na zbytková vnitřní napětí?

**V3:** Jaký je vliv předehřevu substrátu na zbytková vnitřní napětí?

**V4:** Jaký je vliv velikosti pruhu u S a ostrova u CH na zbytková vnitřní napětí?

**V5:** Jaký je vliv šrafovací vzdálenosti u strategie M na zbytková vnitřní napětí?

**V6:** Který zkoumaný parametr má největší vliv na zbytková vnitřní napětí?

**V7:** Které parametry lze doporučit jako neoptimálnější pro SLM výrobky z oceli 316L?

**V8:** Splnil daný experiment předpoklady a jsou výsledky z něj relevantní?

## 4.3 Stanovení hypotéz

Na základě výsledků získaných z relevantních odborných zdrojů byly stanoveny hypotézy, které mají být ve studii potvrzeny nebo vyvráceny. Přestože je vycházeno z odborných studií, je nutné brát jejich výsledky s rezervou a dívat se na ně jako na hypotézy. Důvodem mohou být odlišnosti mezi tímto experimentem a experimentem na jehož výsledcích stojí hypotéza. Mezi hlavní odlišnosti lze zařadit rozdílné výrobní stroje, procesní parametry a materiály. Předpokládá se však, že pokud má daný parametr významný vliv na změny vnitřních napětí, projeví se více méně v jakémkoli experimentu velice podobně. Shoda či případná neshoda výsledků tohoto experimentu s předpokládanými výsledky pak také může ledaco napovědět o relevantnosti provedení a vyhodnocení tohoto experimentu.

**H1:** Strategie CH případně S generuje nejnižší zbytková napětí. (Kruth a kol., 2018).<sup>25</sup>

**H2:** S rostoucím výkonem laseru se snižují zbytková napětí. (Malý a kol., 2019).<sup>28</sup>

**H3:** Předehřev substrátu snižuje zbytková napětí. (Shiomi a kol., 2004).<sup>26</sup>

**H4:** Kratší skenovací vektory snižují zbytková napětí (Mercelis a kol., 2006).<sup>24</sup>

**H5:** Se zvětšující se šrafovací vzdáleností se zmenšují deformace (Pohl a kol., 2001).<sup>27</sup>

**H6:** Největší vliv na zbytková napětí má předehřev a výkon laseru (Malý a kol., 2019).<sup>28</sup>

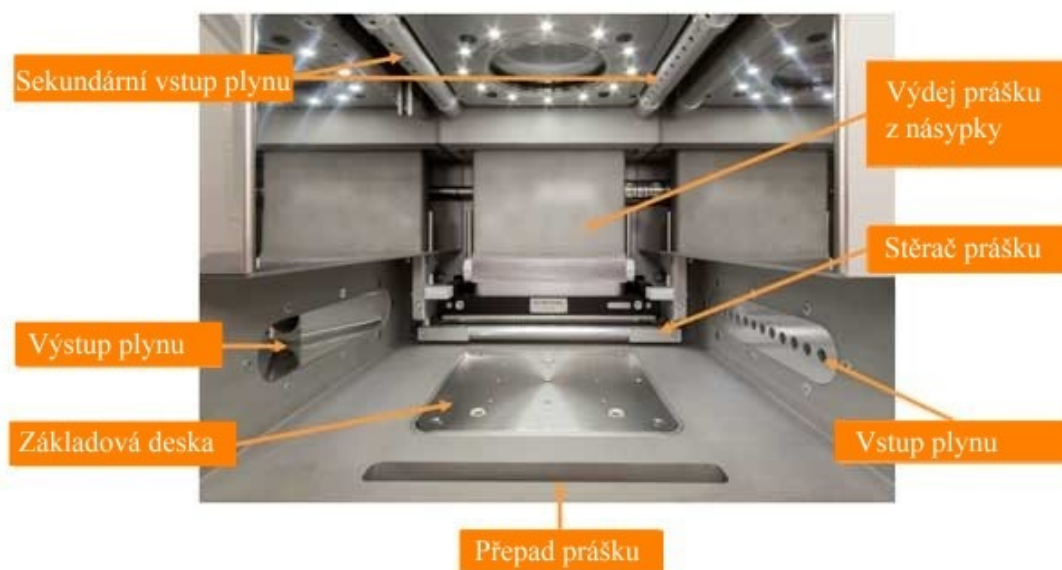
**H7:** Metoda BCM je rychlá a spolehlivá metoda (Malý a kol., 2019).<sup>28</sup>

## 5 Návrh experimentu

### 5.1 Zvolený stroj Renishaw AM 400

*K výrobě zkušebních vzorků byl zvolen stroj AM 400 od britské společnosti Renishaw, který pracuje na principu metody SLM. Pracovní komora je zachycena na Obr. 21, samotný stroj na*

Obr. 22 a jeho technické parametry jsou v Tab. 2. Jedná se o vylepšenou verzi stroje AM 250 s modifikovaným řídicím systémem optiky, přepracovaným prouděním plynu, ochranným systémem okna a novým optickým vláknovým laserem o výkonu 400 W. Jako inertní plyn je užíván argon, který vytěsňuje kyslík na koncentraci (1000-100) ppm. Tento plyn proudí během výroby stavební komorou a je regenerován přes filtrační zařízení, kde jsou zachyceny nečistoty z tavby prášku. Stroj se skládá ze stavební komory, filtračního systému, sestavy mechanismu pro pohyb základní desky v ose Z, elektronické části a laseru s optickým systémem. Stavební komora obsahuje otvory pro přívod a odvod argonu, základní stavební desku, otvor pro přívod prášku z násypky, otvor pro odvod přebytečného prášku a silikonovou lištu pro jeho rozptýření po základní desce. Mezi periferní vybavení stroje patří chladicí zařízení optického systému a laseru, odvlhčovač vzduchu, mokrá odlučovač prášku, nádoby pro manipulaci s práškem, prosévací zařízení pro regeneraci prášku, tlaková nádoba s argonem a čidlo pro detekci jeho úniku. Toto zařízení běžně pracuje s výrobcem certifikovanými práškovými materiály jako je vysokopevnostní ocel (Maraging steel M300), hliníková slitina (AlSi10Mg), titanová slitina (Ti6Al4V), slitina kobalt-chrom (CoCr-0404), slitina nikl-chrom (Inconel 718, Inconel 625), korozivzdorná ocel (316L). Pro import CAD dat a nastavení procesních parametrů byl použit slicer software QuantAM pracující na principu CAM systému, jehož výstupem je soubor obsahující veškerá procesní data pro činnost stroje. Zařízení provozuje na VŠB-TU Ostrava centrum aditivních technologií Protolab pod Katedrou obrábění, montáže a strojírenské metrologie.<sup>33</sup>



Obr. 21 Pracovní komora stroje AM 400<sup>33</sup>

Tab. 2 Technické parametry stroje <sup>33</sup>

Parametr	Hodnota	Jednotka
Max. rozměry stavebního prostoru ( $X \times Y \times Z$ )	$250 \times 250 \times 300$	mm
Rychlost tavení (dle materiálu) $v_t$	5-20	$\text{cm}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$
Max. rychlost skenování $v_s$	2000	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Rychlost polohování $v_p$	7000	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Přesnost polohování v ose X, Y $P_{xy}$	$\pm 25$	$\mu\text{m}$
Přesnost polohování v ose Z $P_z$	$\pm 2$	$\mu\text{m}$
Tloušťka vrstvy $t$ (dle velikosti prášku)	20-100	$\mu\text{m}$
Typ laseru	Nd: YAG	-
Průměr laserového paprsku $d$	70	$\mu\text{m}$
Vlnová délka laseru $\lambda_l$	1070	nm
Režim laseru	Pulzní	-
Max. výkon laseru $P_{max}$	400	W
Přehřev substrátu $T$	0-170	$^{\circ}\text{C}$
Min. tlak v komoře při vakuu $p_{min}$	5	kPa
Pracovní tlak v komoře $p$	101-202	kPa
Inertní plyn	Argon	-
Objem inertního plynu pro vyplnění komory $Q$	600-800	l
Běžná spotřeba plynu $Q_p$	30-50	$\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$
Napětí $U$	AC: 220-240	V
Proud $I$	16	A
Rozměry bez příslušenství ( $X \times Y \times Z$ )	$1700 \times 853 \times 2115$	mm
Hmotnost $m$	1225	kg
Hlučnost $A_t$	67	dB
Software	QuantAM	-

Obr. 22 Renishaw AM 400 <sup>10</sup>

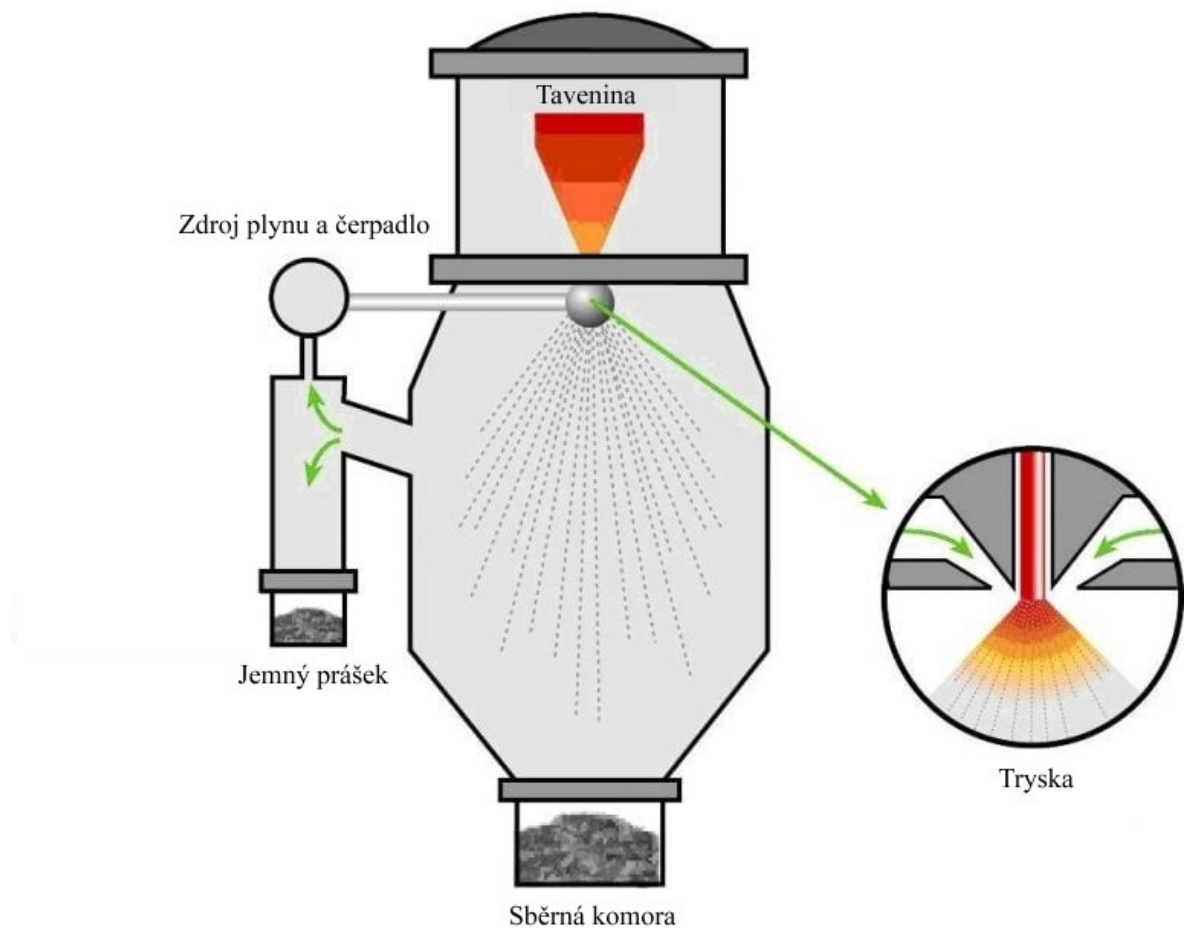
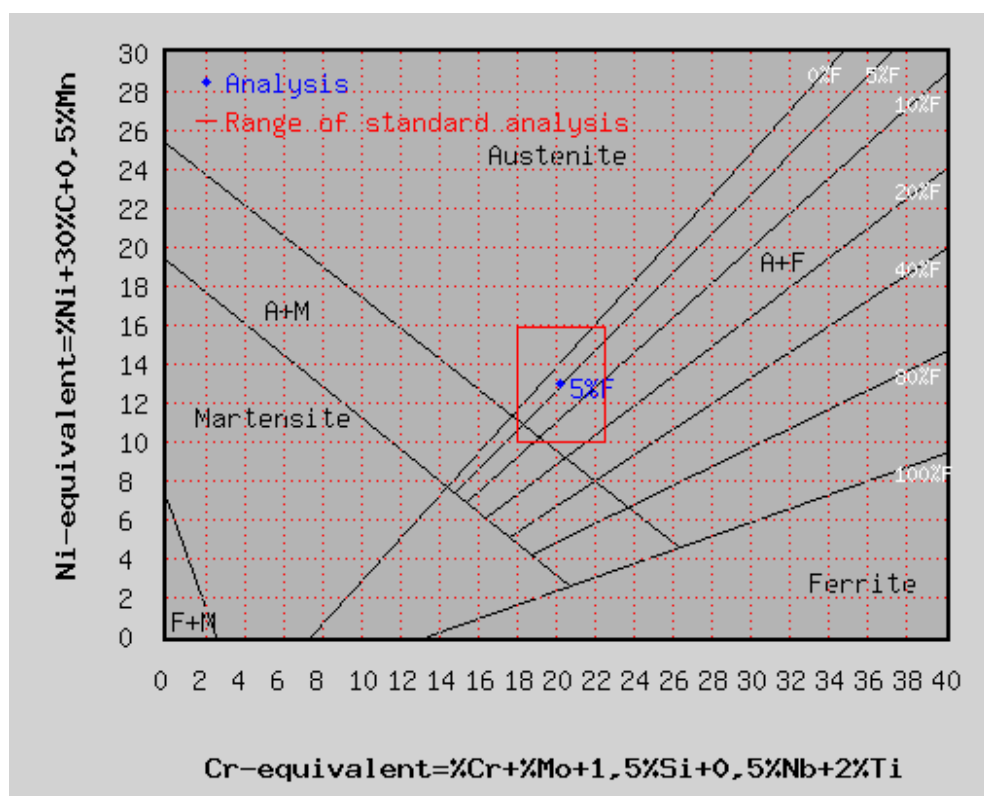
## 5.2 Testovaný práškový kov 316L

Pro experimenty byl použit práškový kovový materiál od společnosti Renishaw pod označením 316L dle normy AISI (X2CrNiMo17-12-2 dle ČSN EN 10027-1, 1.4404 dle ČSN EN 10027-2). Chemické složení a hlavní fyzikální parametry jsou seskupeny v Tab. 3, respektive v Tab. 4. Mechanické vlastnosti testovaných vzorků vyrobených výrobcem na stroji AM 250 ( $P = 200 \text{ W}$ ,  $t = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ) jsou shrnuty v Tab. 5. Prášek byl vyroben metodou plynové atomizace, která zaručuje pravidelný sférický tvar zrna o velikosti  $d_p = (45 \pm 15) \text{ }\mu\text{m}$ . Proces atomizace spočívá v protlačování roztaveného kovu tryskou a následném rozprášení taveniny urychleným inertním plynem, viz Obr. 23. Ztuhlé sférické částice jsou pak nahromaděny na dně komory. U reaktivních materiálů se využívá plazmové atomizace. Výrobce dodává prášek ve speciální hermetické nehořlavé nádobě, aby nepřišel do kontaktu s vlhkostí a kyslíkem.<sup>34, 35</sup>

Jedná se o austenitickou korozivzdornou nestabilizovanou ocel s velmi nízkým obsahem uhlíku a přísadou molybdenu. Díky vhodnému množství austenitotvorných prvků (Ni, Mn, N) má tato ocel ve struktuře austenit za běžných teplot i za teplot pod bodem mrazu. Proto je ocel paramagnetická, nedochází k fázovým přeměnám tudíž ji nelze zakalit. Ve struktuře se může vyskytnout také malé množství delta feritu (Obr. 24), který je feromagnetický. Ke zpevňování dochází pouze tvářením za studena, kdy vzniká deformační martenzit. Vlivem nízkého obsahu uhlíku je ocel méně náchylná na vylučování karbidů chromu na hranicích zrn a tím je snížena náchylnost na vznik mezikrystalové koroze (MKK). Legování molybdenem navíc zvyšuje odolnost k bodové a důlkové korozi. Ocel je dobře obrobitelná, lze ji vyleštit do vysokého lesku a vykazuje vysokou pevnost a vrubovou houževnatost při nízkých i vysokých teplotách. Tato ocel má předpoklady pro použití v aditivní výrobě díky výborné svařitelnosti a houževnatosti. Uplatňuje se v chemickém, farmaceutickém, textilním a potravinářském průmyslu. Modifikací této oceli je titanem uklidněná ocel 316Ti, kterou však výrobce v práškové podobě nenabízí.<sup>35, 36</sup>

Austenitické oceli obecně nejsou odolné ke koroznímu praskání pod napětím, mají oproti běžným ocelím velmi nízkou tepelnou vodivost a vyšší teplotní roztažnost. Jako tepelné zpracování se může volit rozpouštěcí žíhání s ohřevem na  $(1000-1150) \text{ }^\circ\text{C}$  s prudkým ochlazením pro rozpuštění vyloučených karbidů a dosažení homogenního austenitu. Svařují se bez předehřevu a tepelného zpracování, s teplotou interpass max.  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , s tepelným příkonem max.  $1,15 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$  a krátkými svary. Bývají náchylné na trhliny za horka a pokud nejsou uklidněny nebo u nich není snížen obsah uhlíku, tak i k precipitaci karbidů  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . V intervalu teplot  $(500-800) \text{ }^\circ\text{C}$  hrozí vznik křehké intermetalické fáze sigma. Obsah delta feritu se doporučuje  $(3-10) \%$ . Vliv feritotvorných prvků, je vyjádřen ekvivalentem chromu a vliv austenitotvorných prvků je vyjádřen ekvivalentem niklu. Na základě těchto ekvivalentů jsou pak k predikci výsledné struktury Cr-Ni ocelí zkonstruovány diagramy, jako je například Schaefflerův.<sup>36</sup>



Obr. 23: Proces plynové atomizace<sup>37</sup>Obr. 24 Schaefflerův diagram oceli 316L<sup>38</sup>

Tab. 3 Chemické složení oceli 316L <sup>35</sup>

Prvek	Množství (%)
Fe	Balancuje
Cr	16,00-18,00
Ni	10,00-14,00
Mo	2,00-3,00
Mn	≤ 2,00
Si	≤ 1,00
N	≤ 0,10
O	≤ 0,10
P	≤ 0,045
C	≤ 0,03
S	≤ 0,03

Tab. 4 Fyzikální vlastnosti oceli 316L <sup>35</sup>

Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota $\rho$	7999	kg·m <sup>-3</sup>
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$	16,2	W·(m·K) <sup>-1</sup>
Rozsah teplot tání $T_i$	1371-1399	°C
Součinitel teplotní délkové roztažnosti $\alpha_t$	16·10 <sup>-6</sup>	K <sup>-1</sup>
Měrná tepelná kapacita $c_p$	500	J·(Kg·K) <sup>-1</sup>
Měrná elektrická vodivost $\gamma$	1,252·10 <sup>6</sup>	S·m <sup>-1</sup>

Tab. 5 Mechanické vlastnosti vzorků z oceli 316L vyrobených AM <sup>35</sup>

Veličina	Hodnota	Jednotka
<b>Mez pevnosti v tahu <math>R_m</math> po obrobení (ASTM E8)</b>		
Ve vodorovném směru (X, Y)	676 ± 2	MPa
Ve svislém směru (Z)	624 ± 17	MPa
<b>Smluvní mez kluzu v tahu <math>R_{p0,2}</math> po obrobení (ASTM E8)</b>		
Ve vodorovném směru (X, Y)	547 ± 3	MPa
Ve svislém směru (Z)	494 ± 14	MPa
<b>Tažnost při přetržení <math>A</math> po obrobení (ASTM E8)</b>		
Ve vodorovném směru (X, Y)	43 ± 2	%
Ve svislém směru (Z)	35 ± 8	%
<b>Modul pružnosti <math>E</math> po obrobení (ASTM E8)</b>		
Ve vodorovném směru (X, Y)	197 ± 4	GPa
Ve svislém směru (Z)	190 ± 10	GPa
<b>Tvrdost dle Vickerse <math>HV_{0,5}</math> po leštění</b>		
Ve vodorovném směru (X, Y)	198 ± 8	-
Ve svislém směru (Z)	208 ± 6	-
<b>Parametr drsnosti povrchu <math>R_a</math> po otryskání</b>		
Ve vodorovném směru (X, Y)	4-6	μm
Ve svislém směru (Z)	4-6	μm



## 5.3 Vybrané testované proměnné a počet vzorků

### 5.3.1 Statistická metodika DoE a Taguchiho metoda

Pro navržení dostatečného počtu vzorků a jejich rozvržení byla použita metoda DoE (Design of Experiment). Tato metoda umožňuje nalézt požadovaný výsledek s minimem dat a výpočtů. Byly zvoleny běžné skenovací strategie Chessboard (CH), Stripes (S) a Meander (M). Dále byly stanoveny faktory, mezi které byl vybrán výkon laseru, velikost ostrůvku u strategie CH, velikost pruhu u strategie S a šrafovací vzdálenost u strategie M. Zvolené skenovací strategie a procesní parametry jsou v Tab. 6. Faktory pak mohou mít několik úrovní, v daném případě každý faktor nabývá čtyř různých pevně stanovených hodnot. Faktory vstupující do procesu způsobují odezvy (deformace), které nabývají určitých hodnot. Výsledkem této metodiky DoE je nutný počet experimentů stanovený dle vzorce (5.1). Dle výpočtu je pro testování potřeba 16 experimentů (vzorků) a to pro každou skenovací strategii. Celkem je tedy nutno navrhnout a zhotovit 48 vzorků, s tím, že polovina z nich bude vyrobena s předehřevem substrátu a druhá polovina bez předehřevu. Dále byla použita Taguchiho metoda, která redukuje počet potřebných testů plně faktoriálního systému, avšak při zachování vlivů jednotlivých faktorů na konečný vzorek.<sup>39</sup>

Tab. 6 Zvolené skenovací strategie a procesní parametry

Parametr	Hodnota		
Skenovací strategie	CH	S	M
Velikost ostrůvku $l_{CH}$ (mm)	3/5/7/10	-	-
Velikost pruhu $l_S$ (mm)	-	3/5/7/10	-
Šrafovací vzdálenost $h_d$ (μm)	110	110	60/110/180/240
Objem. hustota v. e. $E_v$ (J·mm <sup>-3</sup> )	28/56/84/112	28/56/84/112	13-205
Výkon laseru $P$ (W)	100/200/300/400		
Předehřev $T$ (°C)	0/170		
Rychlost skenování $v_s$	650 mm·s <sup>-1</sup>		
Průměr laseru $d$	70 μm		
Úhel pootočení mezi vrstvami $\varphi$	67 °		
Skenovací posunutí $X_I, Y_I$	1 μm		
Orientace vzorků na základní desce	Viz Obr. 29, Obr. 30		
Doba trvání pulzu $ET$	60 μs		
Vzdálenost mezi pulzy $s$	80 μm		
Tloušťka vrstvy $t$	50 μm		
Tlak v komoře $p$	101 kPa		
Čistota argonu $p_p$	5 ppm		

**Počet experimentů:**

$$n = l^f \quad (5.1)$$
$$n = l^f = 4^2 = 16$$

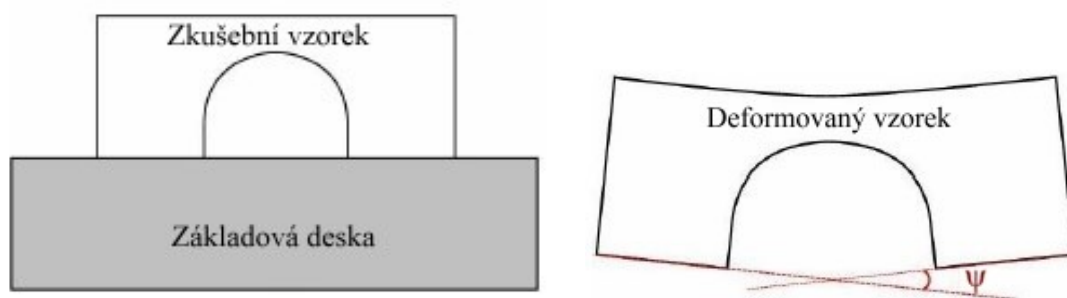
Kde:

$l$  = počet úrovní faktorů

$f$  = počet faktorů

## 5.4 Zvolená metoda měření BCM

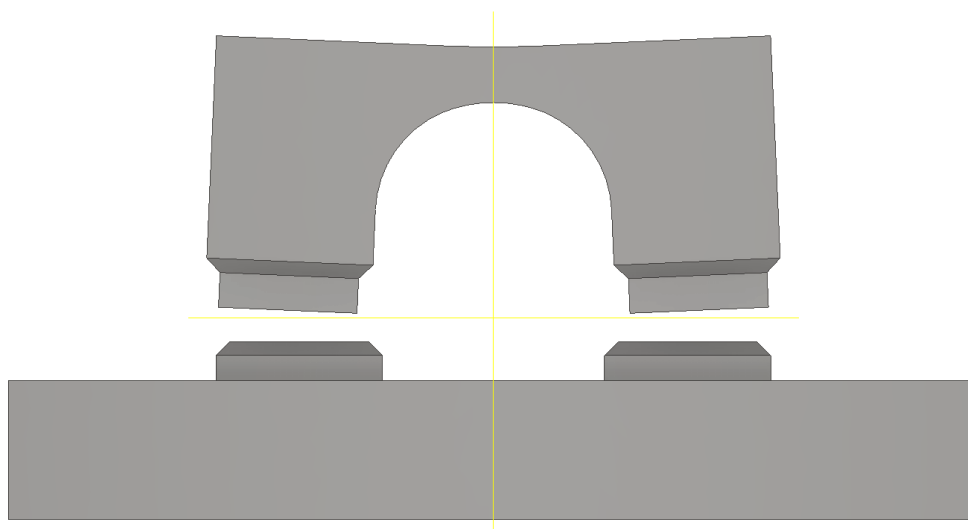
Tato metoda byla použita pro posouzení vnitřního napětí, respektive měření deformace u testovaných vzorků v experimentu. Jde o dostatečně přesnou, jednoduchou a rychlou destruktivní metodu. Princip je takový, že po separaci výrobku ze základní desky stroje, dojde k uvolnění napětí a vzniku deformace, tak jak ukazuje Obr. 25. Aby byla deformace dobře měřitelná, musí být navržena vhodná geometrie vzorku. Pro výzkum zbytkového napětí u aditivní metody SLM vyvinul Kruth a spol. (2012) <sup>25</sup> metodu Bridge Curvature Method (BCM) se speciální geometrií mostu. Tato metoda se stala východiskem pro experimenty celé řady dalších autorů. Mostový vzorek se po odstranění ze základové desky deformuje pod určitým úhlem, který se následně měří. Odstranění vzorků může být provedeno pomocí EDM drátořezu nebo pásové pily. Drátořez je méně produktivnější, ale nabízí kvalitnější řez a méně ovlivněnou řeznou plochu. Úhel deformace je tak možné měřit přímo na řezné hraně. V případě použití pásové pily se nabízí spíše měření na pomocné tištěné hraně. Měření úhlu může být provedeno pomocí naskenování vzorku 3D skenerem s následným srovnáním s 3D modelem v CAD systému. Další možností je nasnímání deformace vzorku na mikroskopu s následným změřením úhlu v CAD systému. Alternativou může být též měření úhlu na souřadnicovém měřicím stroji kontaktní nebo lépe bezkontaktní metodou. V tomto případě by bylo nutné disponovat daným strojem, a také vzít v úvahu vyšší časovou náročnost měření, vyhodnocování, případně upínání. Bylo by také možné před odřezáním vzorku vhodně aplikovat tenzometry, díky čemuž by však tato metoda měření ztratila jednoduchost. Velikost úhlu deformace reprezentuje vnitřní napětí, které roste přímo úměrně s rostoucím úhlem. Pro stanovení konkrétní hodnoty zbytkového napětí by bylo nutné využít MKP. Pro kvalitativní hodnocení vzorků vyráběných za různých podmínek a s odlišnou strategií však plně postačuje porovnávat vyvolané deformace. Přesnost měření úhlů může být ovlivněna kvalitou řezu, kvalitou tištěných hran a přesností měření úhlu. Z tohoto důvodu Malý a kol. (2019) <sup>28</sup> využívá ve své studii měření úhlu na horní ploše vzorku, čímž eliminuje většinu negativních vlivů.



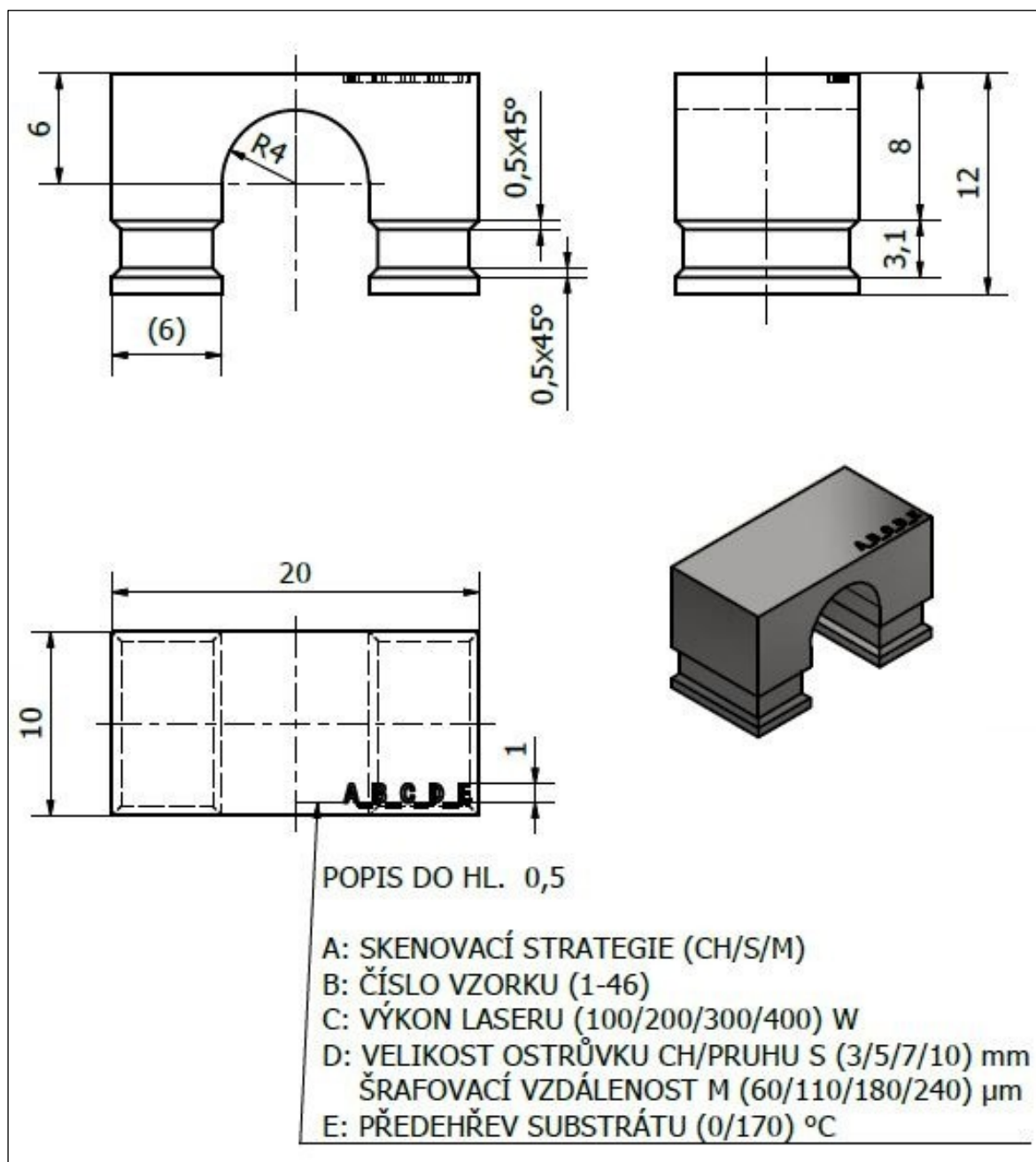
Obr. 25 Princip metody měření profilu <sup>25</sup>

#### 5.4.1 Navržené zkušební vzorky

Dle zvolené metody měření BCM byly navrženy vhodné vzorky mostové geometrie, viz Obr. 27. Geometrie i rozměry zkušebních vzorků vycházejí z prvotního návrhu, které započal Kruth a spol. (2012) <sup>25</sup>. Jelikož se počítalo s oddělováním vzorků ze základní desky pomocí pásové pily byly vzorky opatřeny vodící drážkou pro lepší vedení pilového pásu. K vytvoření 3D CAD modelu byl použit software Autodesk Inventor Professional 2020. Predikce deformace modelu vzorku po jeho separaci ze základní desky je zobrazena na Obr. 26. Každý vzorek byl opatřen identifikačním kódem pro rozeznání separovaných vzorků mezi sebou. Legenda a umístění popisu je patrná z Obr. 27. Při výrobě zkušebních vzorků se nepočítá s použitím dočasných podpůrných struktur a po jejich odřezání má část vzorku zůstat na základové desce. Díky absenci podpůrných struktur by měla být do vzorku vnesena větší zbytková napětí a po jejich odřezání by se měla zbytková napětí projevit v podobě dostatečně velké deformace.



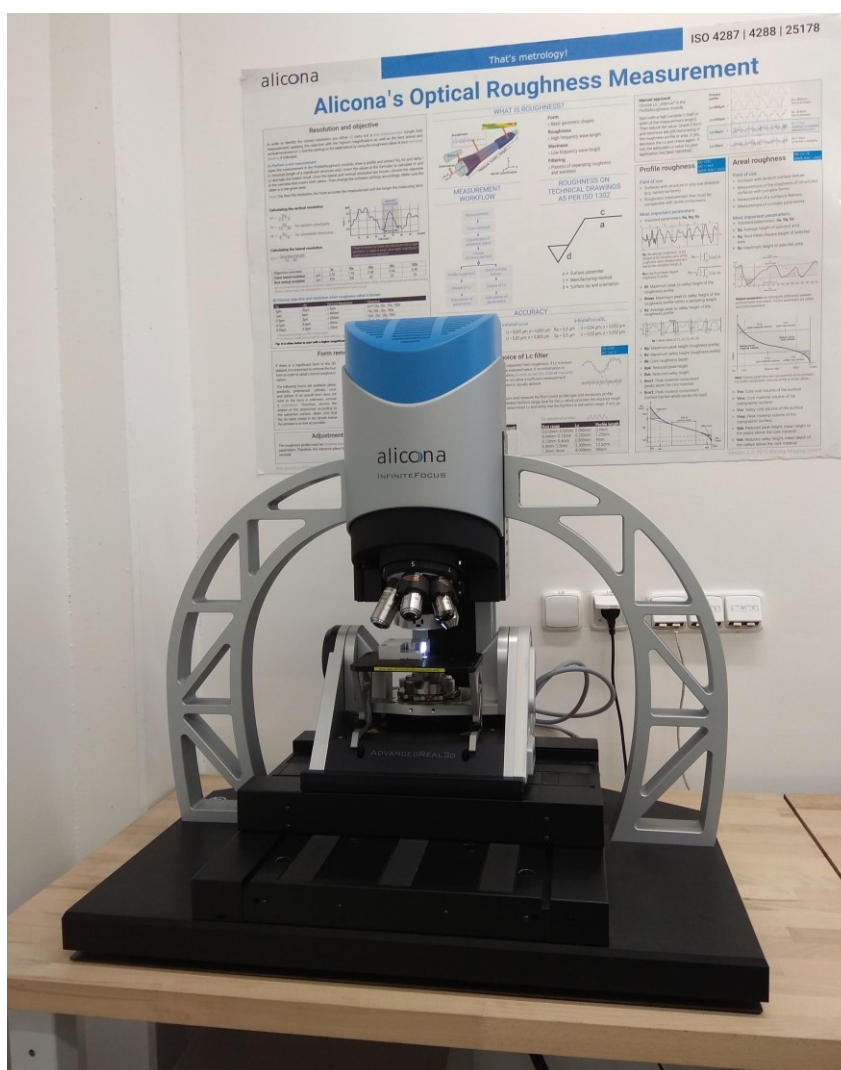
Obr. 26 Predikce deformace modelu vzorku po separaci ze základní desky



Obr. 27 Výrobní výkres navrženého zkušebního vzorku

## 5.5 Zvolený mikroskop Alicona Infinite Focus

Ke skenování deformace jednotlivých zkušebních vzorků byl využit optický mikroskop Alicona Infinite Focus rakouské společnosti Alicona, viz Obr. 28. Výstupem byl detailní snímek každého vzorku. Jde o vysoce přesný, rychlý a flexibilní optický 3D systém měření povrchu, který kombinuje rozměrovou metrologii a měření drsnosti povrchu. Přístroj je schopen měřit s vysokou opakovatelností a svislým rozlišením až 10 nm. Robustní systém měření typu Focus Variation v kombinaci s hardwarem izolujícím vibrace umožňuje měření tvaru a drsnosti i velkých a těžkých součástí. Všechny osy jsou vybaveny vysoce přesnými enkodéry zajišťující přesný pohyb stolu. Díky automatickému rozhraní bývá přístroj také používán pro plně automatizované měření ve výrobě. Zařízením disponuje na VŠB-TU Ostrava Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie.<sup>40</sup>



Obr. 28 Mikroskop Alicona Infinite Focus

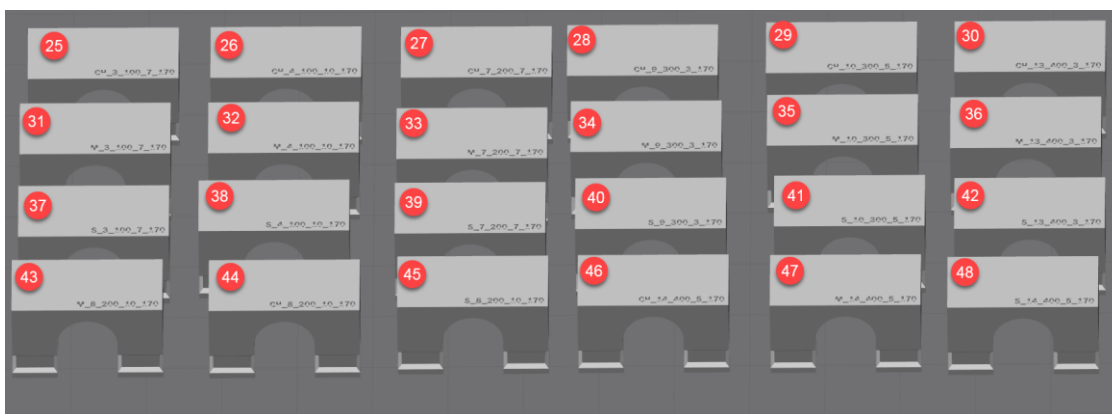
## 6 Realizace a průběh experimentu

### 6.1 Výrobní proces zkušebních vzorků

Vytvořené 3D CAD modely byly v softwaru Inventor převedeny do formátu STL. Vzniklé soubory byly importovány do slicer softwaru QuantAM, který je součástí stroje Renishaw AM 400. V prostředí tohoto softwaru byly vzorky rozděleny na vrstvy, rozmístěny na základovou desku stroje a byly pro ně navoleny veškeré volitelné procesní parametry. Vznikly dvě série vzorků, s tím, že jedna byla vyráběna bez předehřevu základové desky (Obr. 29) a druhá s předehřevem základové desky (Obr. 30).



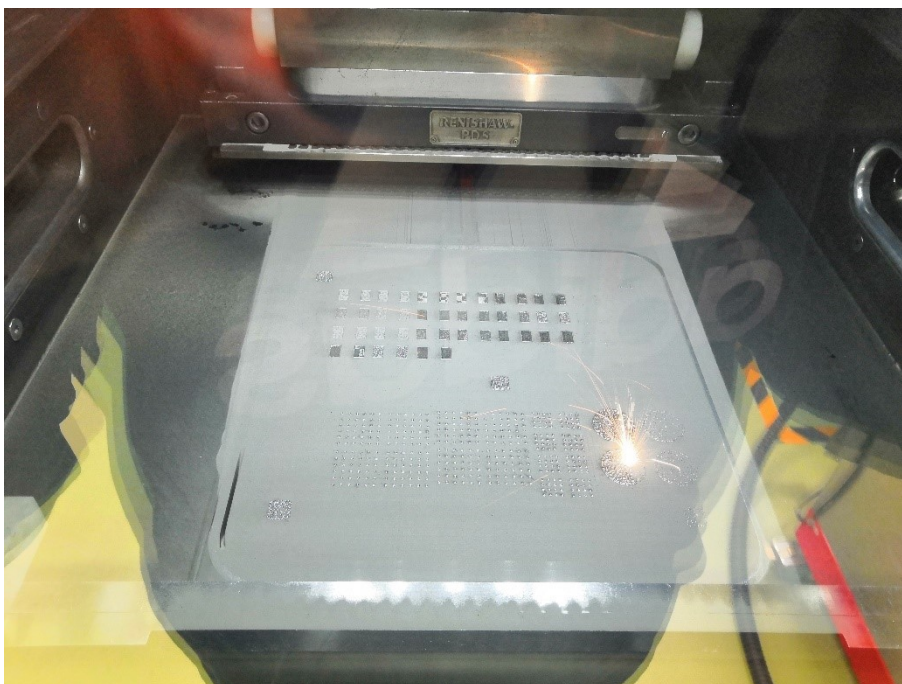
Obr. 29 Rozmístění série vzorků na základové desce vyráběných bez předehřevu



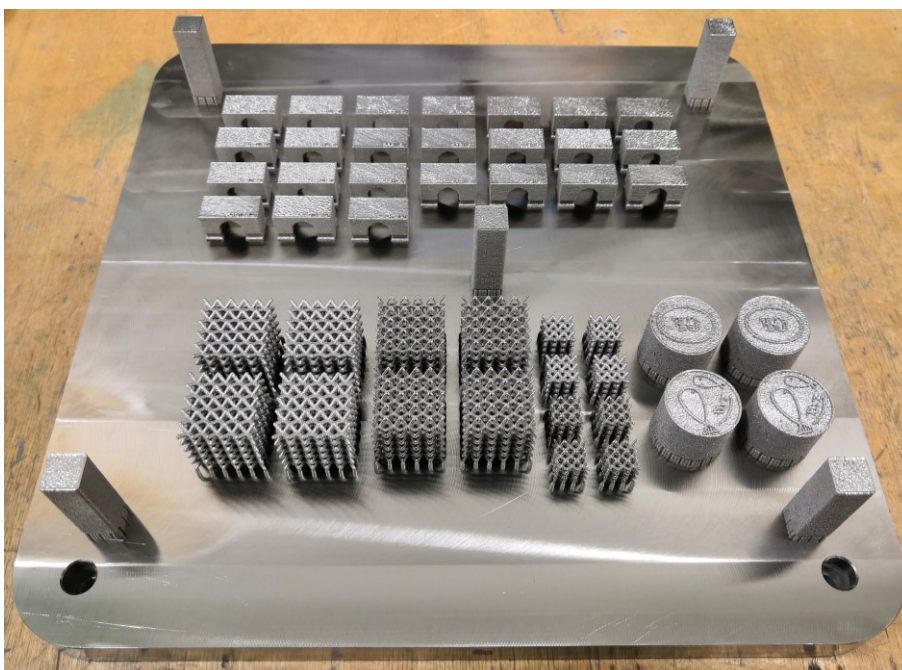
Obr. 30 Rozmístění série vzorků na základové desce vyráběných s předehřevem

Po virtuální přípravě výrobního procesu bylo přistoupeno k samotné výrobě zkušebních vzorků na stroji Renishaw AM400. Nejprve však proběhla korekce tloušťky stavěcí desky, doplnění zásob práškového kovu a kontrola množství inertního plynu Argonu. Po dokončení výroby byl z komory stroje odstraněn přebytečný písek a základní deska se vzorky byla vyjmuta. Průběh výroby série vzorků vyráběných bez předehřevu je zachycen na Obr. 31 a vyhotovené vzorky na stavěcí desce na Obr. 32. V rámci série vzorků vyráběných bez předehřevu byly vyrobeny navíc další výrobky mimo rámec tohoto experimentu. Jelikož popis vzorků nebyl dobře čitelný, byly vzorky dodatečně identifikovány čísly pomocí fixu.



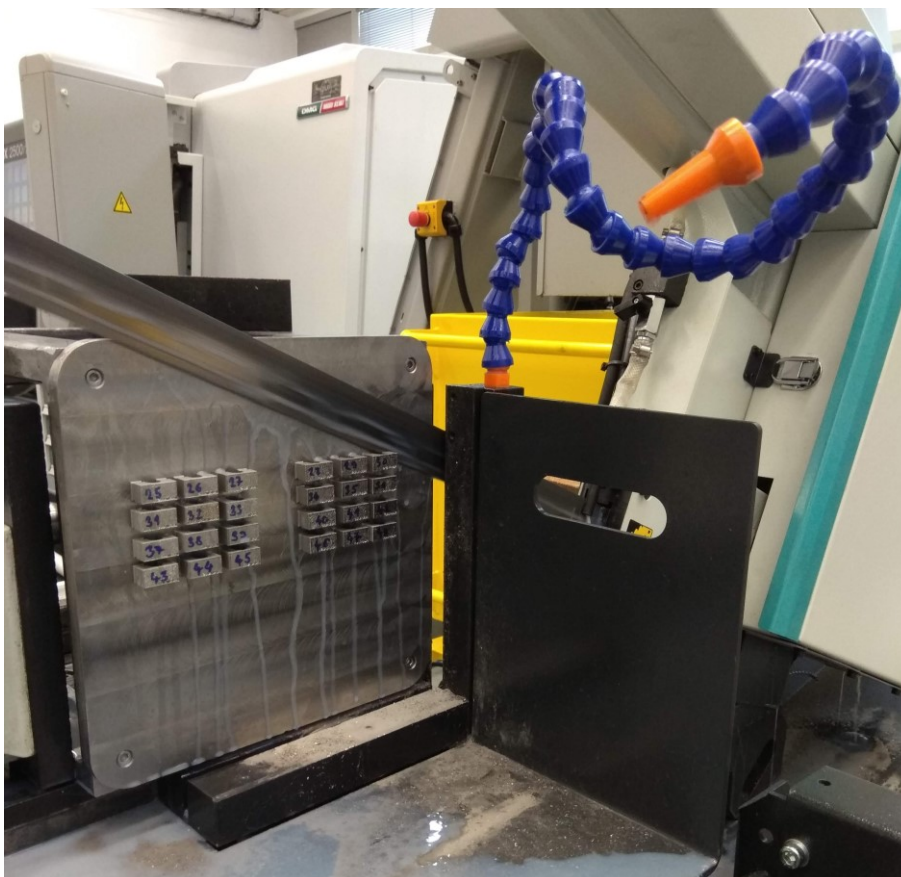


*Obr. 31 Průběh výroby ve stavební komoře stroje AM 400*



*Obr. 32 Vyhotovené vzorky na základní desce*

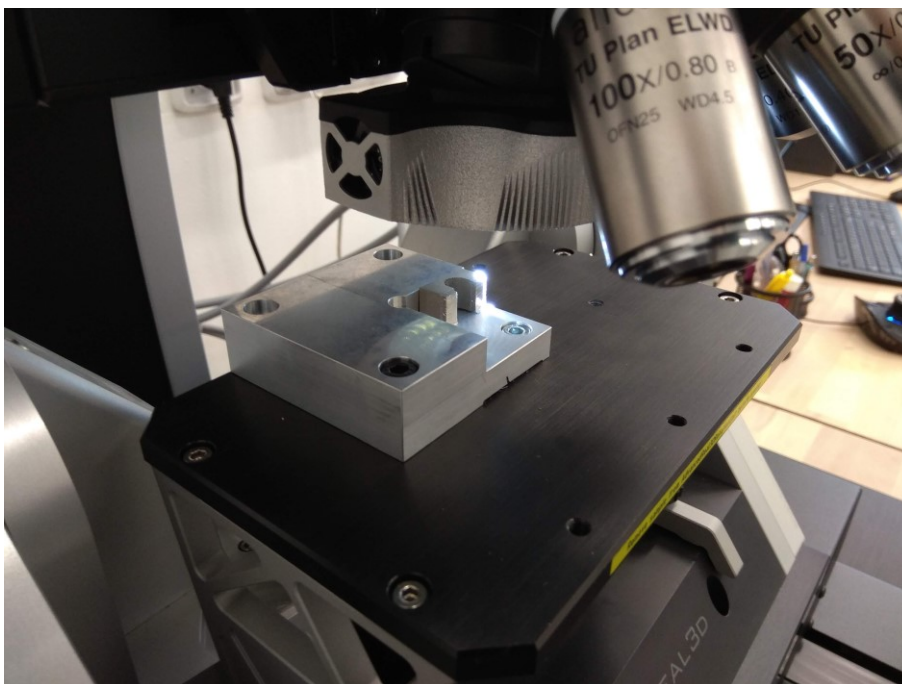
Nakonec proběhla separace zkušebních vzorků pomocí pásové pily Pegas, viz Obr. 33. Základová deska se vzorky byla upevněna na speciální přípravek pomocí čtyř šroubů. Celý komplet byl vhodně ustaven vzhledem k pilovému pásu, k jehož vedení byly využity již zmiňované vodící drážky na vzorcích. Při řezání byla využita procesní kapalina, tudíž vzorky nebyly tepelně ovlivněny. Poté již byly vzorky zbaveny otřepů ručními nástroji. Základová deska byla zbavena zbytkových částí vzorků a zarovnána pomocí frézování, tak aby byla připravena k opětovnému použití. Pásová pila je součástí strojového parku, kterým disponuje VŠB-TU Ostrava Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie.



Obr. 33 Separace vzorků ze stavěcí desky pomocí pásové pily Pegas

## 6.2 Snímání deformace zkušebních vzorků

Deformace separovaných vzorků v podobě úhlu byly nasnímány pomocí mikroskopu Alicona s magnifikací  $2,5\times$ . Vzorek byl umístěn na polohovací pracovní stůl mikroskopu, manuálně byl zvolen počáteční a koncový bod snímání a v patřičném místě bylo provedeno zaostření. Snímání pak proběhlo automaticky mezi definovanými body. V podpůrném softwaru Alicona Measure Suite 5.3.4 bylo využito prokreslení obrysu vzorku a barev pomocí kterých byla odlišena různá vzdálenost povrchu vzorku od čočky mikroskopu. Výstupem byl barevný snímek povrchu vzorku s dostatečně viditelnou deformací. Každý vzorek byl nasnímán pouze jednou, ale nabízí se také skenování odvrácené strany. Měřicí proces je patrný z Obr. 34.

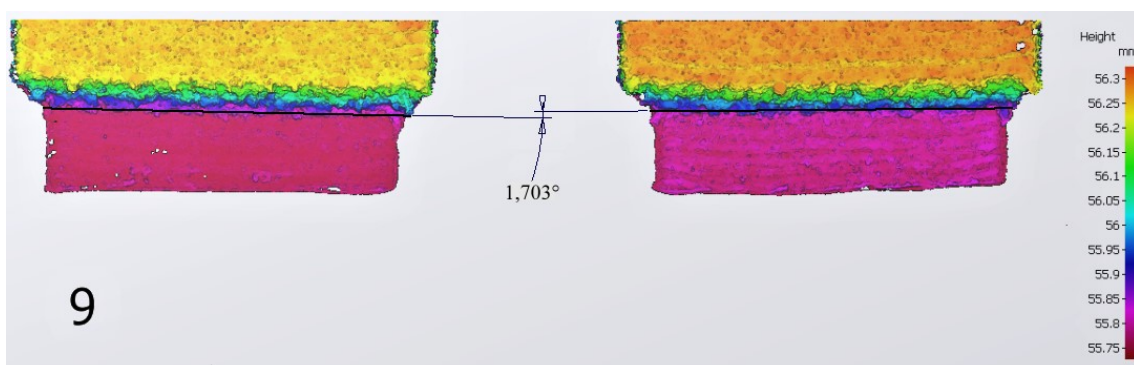
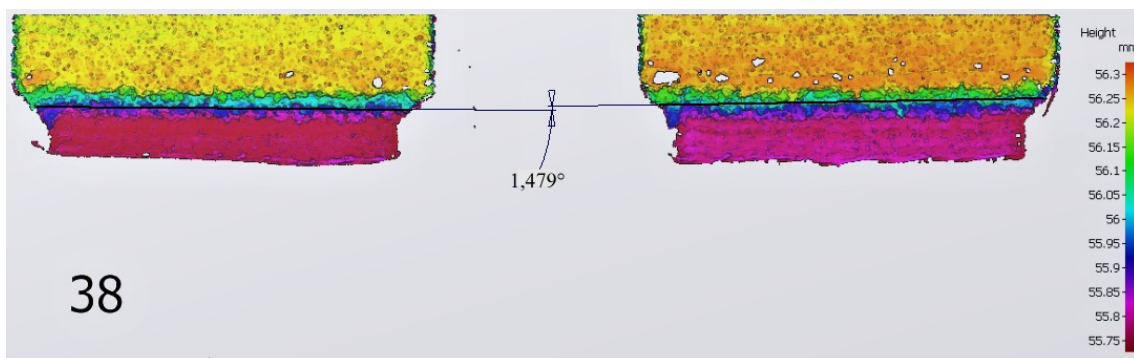
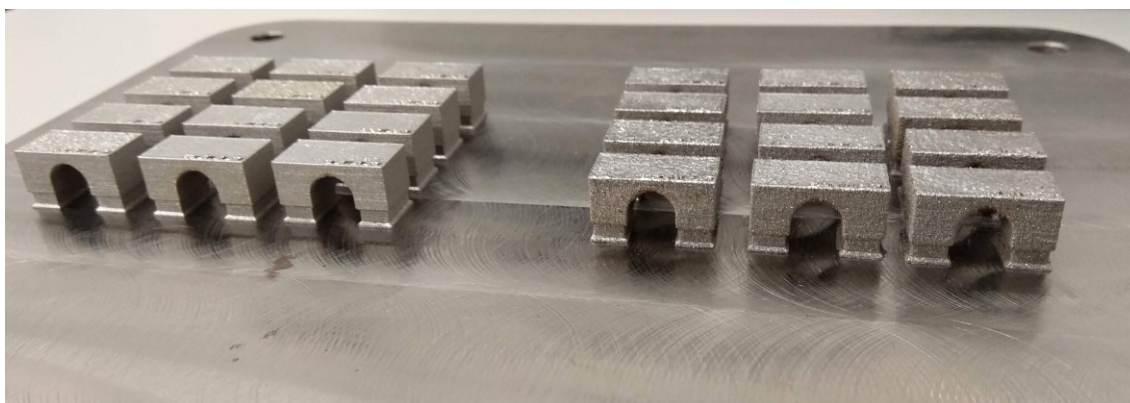


Obr. 34 Snímání zkušebních vzorků po deformaci na mikroskopu Alicona

### 6.3 Měření deformace vzorků v CAD softwaru

Snímky vzorků byly importovány do softwaru Inventor, v kterém byl měřen úhel deformace mezi dvěma manuálně zhotovenými přímkami, které byly vytvořeny na obou hranách osazení vzorku. Měření je pro názornost demonstrováno na vzorku číslo 9 (Obr. 35) a číslo 38 (Obr. 36). Zavedení přímek na každou z hran vzorku probíhalo ručně na základě vizuální identifikace barevně rozlišených hran. Kromě nepřesností zapříčiněných lidským faktorem, měření ovlivňovaly také nepřesnosti vzniklé při výrobě, tedy vady v geometrii vzorku a zhoršená drsnost povrchu způsobená zejména vytvořením kuliček. Právě velice nekvalitní povrch byl patrný u vzorků vyráběných s předeheřevem a vysokým výkonem laseru, což je doloženo na Obr. 37. U každého vzorku bylo provedeno pouze jedno měření. Alternativní měření úhlu na horním povrchu vzorku bylo z důvodu malého projevení deformace prakticky neměřitelné a měření přímo na řezné hraně vzorku by bylo zase příliš ovlivněno nízkou kvalitou řezné plochy po přechodu pilového listu.



*Obr. 35 Měření úhlu deformace vzorku č. 9**Obr. 36 Měření úhlu deformace vzorku č. 38**Obr. 37 Nízká kvalita vzorků (vpravo) způsobená přehřevem a vysokým výkonem laseru*

## 7 Kvalitativní zhodnocení

### 7.1 Metodika vyhodnocování dat

Naměřené hodnoty byly v programu Microsoft Excel zanalyzovány, statisticky zpracovány a vyhodnoceny. Grubbsův test provedený dle vzorce (7.1) a (7.2) pro pravděpodobnost 95 % neodhalil v souboru dat žádné extrémní hodnoty. Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky byly počítány dle vzorce (7.3), respektive (7.4) a výsledná hodnota pak byla zapsána dle vzorce (7.5). Dále byl posuzován vliv společných i specifických posuzovaných proměnných procesních parametrů na úhel deformace u jednotlivých skenovacích strategií a také napříč všemi strategiemi. Byla také vypočtena objemová hustota vyzářené energie  $E_v$ , jejíž vliv se napříč strategiemi obtížně hodnotil, jelikož pouze u strategie M byla proměnná šrafovací vzdálenost. U strategie CH a S byla zase proměnná velikost ostrova, respektive pruhu, která se však do výpočtu objemové hustoty nepromítá. Jelikož se napříč strategiemi měnil pouze výkon laseru, byl dále posuzován pouze výkon laseru, výkon laseru v kombinaci s předehřevem a výkon laseru v kombinaci bez předehřevu. Posouzen byl samozřejmě i ten nejzásadnější činitel, čímž byla skenovací strategie. Byly vypracovány přehledné tabulky hodnot na základě, kterých byly vytvořeny XY bodové grafy, případně sloupcové grafy. Body v grafech byly pomocí regresní analýzy (spojnice trendu) aproximovány vhodnou funkcí, tak aby se hodnotou spolehlivosti  $R^2$  co nejvíce blížila 1. Bylo tak možné zjistit funkční závislosti a vyhodnotit sílu korelace. Byla zvýrazněna hodnota zkoumaného parametru, při kterém byl úhel deformace nejmenší a pomocí t-testu bylo zjišťováno, zda je vliv na potlačení úhlu deformace v porovnání s ostatními hodnotami daného parametru statisticky významný. Nejprve bylo pomocí F-testu na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  zjišťováno, zda se rozptyly dvou posuzovaných souborů statisticky významně liší. Byla stanovena nulová hypotéza  $H_0$  – rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší a alternativní hypotéza  $H_A$  – rozptyly obou souborů se statisticky významně liší. Jelikož p-hodnota vyšla vždy větší než  $\alpha$ , rozptyly se statisticky významně nelišily,  $H_0$  nebylo možné zamítnout a k dalšímu posuzování byl dále použit dvou výběrový oboustranný t-test na střední hodnotu s rovností rozptylů. Posuzována byla vypočtená pravděpodobnost, tedy p-hodnota se zvolenou hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ , což odpovídá hladině spolehlivosti 95 %. Pokud byla p-hodnota nižší než hladina významnosti  $\alpha$ , šlo o statisticky významný rozdíl mezi posuzovanými hodnotami. Nakonec byl u jednotlivých strategií a také napříč všemi strategiemi pomocí jednofaktorové analýzy rozptylu ANOVA posuzován procentuální účinek jednotlivých proměnných parametrů na úhel deformace a také to, zda je účinek statisticky významný. Naměřené hodnoty úhlů deformací včetně testovaných parametrů a vypočtené objemové hustoty vyzářené energie jsou v Tab. 7. Z histogramu naměřených hodnot úhlů deformací, který je na Obr. 38 je patrné, že je plochý a má mírně asymetrický tvar, který se však blíží ideálnímu zvonovitému.<sup>41</sup>

**Grubbsův test pro minimum:**

$$T_{min} = \frac{\bar{x} - x_1}{s_x} \leq T_{krit} \rightarrow \text{není extrémní} \quad (7.1)$$

Kde:

$x_1$  = minimální hodnota

$x_n$  = maximální hodnota

$T_{krit}$  = kritická hodnota

**Grubbsův test pro maximum:**

$$T_{max} = \frac{x_n - \bar{x}}{s_x} \leq T_{krit} \rightarrow \text{není extrémní} \quad (7.2)$$

**Aritmetický průměr:**

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.3)$$

Kde:

$N$  = počet měření

$x_i$  = jednotlivé naměřené hodnoty

**Směrodatná odchylka:**

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7.4)$$

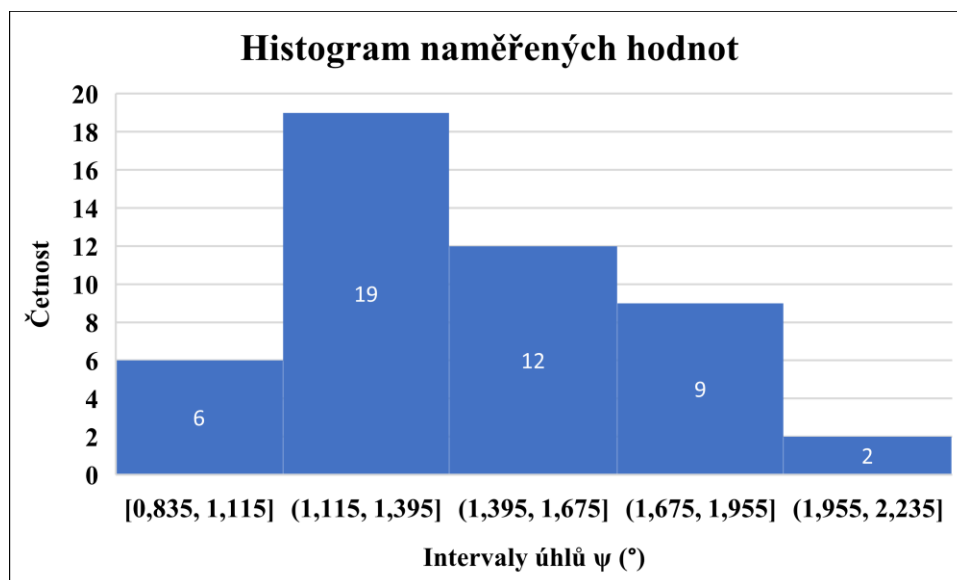
**Zápis výsledné hodnoty:**

$$x = \bar{x} \pm s_x \quad (7.5)$$



Tab. 7 Tabulka hodnot naměřených úhlů deformací

Strategie			Chessboard-CH				Stripes-S				Meander-M			
Parametr	Výkon laseru $P$ (W)	Přehřev $T$ (°C)	Číslo vzorku $N_o$	Velikost ostrůvku $L_{CH}$ (mm)	Úhel deformace $\psi$ (°)	Objem. hustota v. e. $E_v$ (J/mm <sup>3</sup> )	Číslo vzorku $N_o$	Velikost pruhu $L_S$ (mm)	Úhel deformace $\psi$ (°)	Objem. hustota v. e. $E_v$ (J/mm <sup>3</sup> )	Číslo vzorku $N_o$	Šrafovací vzdálenost $h_d$ (μm)	Úhel deformace $\psi$ (°)	Objem. hustota v. e. $E_v$ (J/mm <sup>3</sup> )
Hodnota	100	0	1	3	1,443	28	15	3	1,744	28	8	60	2,198	51
	100	0	2	5	1,293	28	16	5	1,363	28	9	110	1,703	28
	100	170	25	7	1,295	28	37	7	1,444	28	31	180	2,051	17
	100	170	26	10	1,382	28	38	10	1,479	28	32	240	1,703	13
	200	0	3	3	1,375	56	17	3	1,511	56	10	60	1,603	103
	200	0	4	5	1,316	56	18	5	1,448	56	11	110	1,587	56
	200	170	27	7	1,342	56	39	7	1,465	56	33	180	1,801	34
	200	170	44	10	1,121	56	45	10	1,258	56	43	240	1,805	26
	300	170	28	3	0,931	84	40	3	1,183	84	34	60	1,859	154
	300	170	29	5	0,835	84	41	5	1,013	84	35	110	1,744	84
	300	0	5	7	1,182	84	19	7	1,293	84	12	180	1,408	51
	300	0	6	10	1,157	84	20	10	1,296	84	13	240	1,571	38
	400	170	30	3	1,215	112	42	3	1,292	112	36	60	1,806	205
	400	170	46	5	1,088	112	48	5	1,224	112	47	110	1,648	112
	400	0	7	7	1,182	112	21	7	1,298	112	14	180	1,608	68
	400	0	22	10	0,948	112	24	10	1,068	112	23	240	1,767	51
	Průměr $\bar{x}$				1,194	Průměr $\bar{x}$	1,336	Průměr $\bar{x}$				1,741	X	
	SMODCH $s_x$				0,170	SMODCH $s_x$	0,174	SMODCH $s_x$				0,184		



Obr. 38 Histogram naměřených hodnot

## 7.2 Hodnocení a diskuze vlivu parametrů

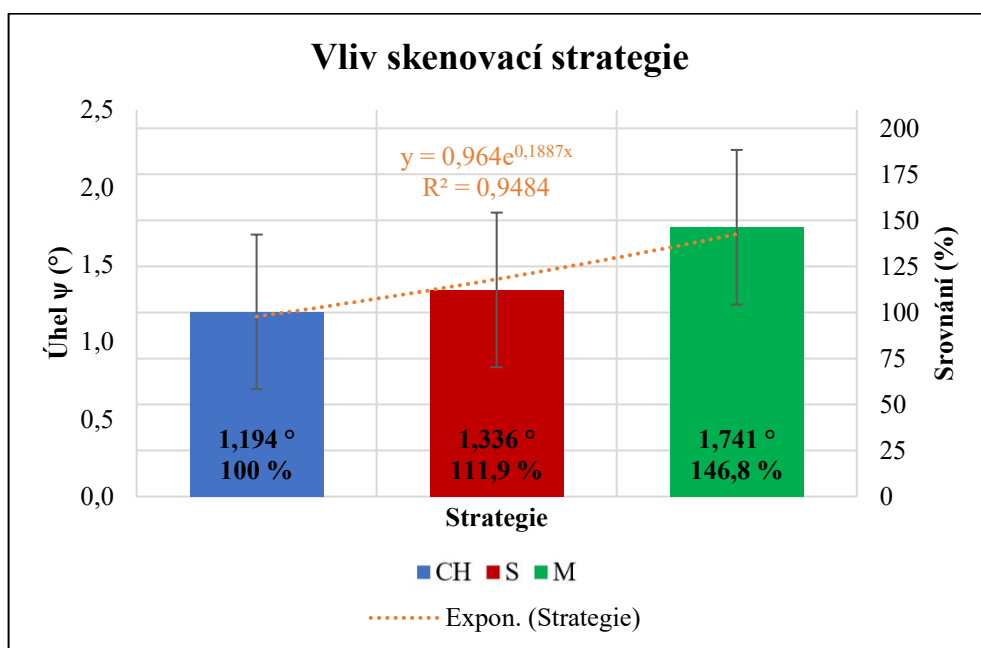
### 7.2.1 Vliv skenovací strategie

**H1:** Strategie CH případně S generuje nejnižší zbytková napětí. (Kruth a kol., 2018).<sup>25</sup>

Primárním cílem této práce bylo zjistit vliv skenovací strategie na zbytková vnitřní napětí. Výsledky jsou seskupeny v Tab. 8 a zobrazeny na Obr. 39. Nejnižší průměrnou odezvu v podobě úhlu deformace vykazovaly vzorky vyrobené skenovací strategií CH a to  $(1,194 \pm 0,170)^\circ$ . Druhá v pořadí byla strategie S s průměrným úhlem deformace  $(1,336 \pm 0,174)^\circ$ , což je o 11,9 % více než u strategie CH. Nejméně příznivá byla strategie M s průměrným úhlem deformace  $(1,741 \pm 0,184)^\circ$ , což je o 30,3 % více než u strategie S a o 45,8 % více než u strategie CH. Rozdíl mezi všemi strategiemi byl statisticky významný s tím, že nejzásadnější rozdíl byl mezi strategií M a S ( $p \approx 0$ ) a tím pádem i mezi M a CH ( $p \approx 0$ ). Naopak nejtěsnější rozdíl byl zaznamenán mezi strategií S a CH ( $p = 0,03$ ). Mezi strategií CH a S a S a M byly u vzorků s totožnými procesními parametry porovnávány hodnoty úhlů dosažených deformací, což je zaznamenáno v Tab. 9 a na Obr. 40. Je patrné že vzorky strategie CH vykazovaly vždy nižší úhel deformace oproti vzorkům strategie S a totožné chování je mezi vzorky strategie S a M. Vliv skenovací strategie na úhel deformace bylo možné s vysokou hodnotou spolehlivosti  $R^2 = 0,95$  proložit rostoucí exponenciální funkcí. Lze tedy vyvodit, že nejnižší zbytková napětí generují strategie CH a S a je tedy možné potvrdit hypotézu H1. I přesto, že nejlepší výsledky vykazovala strategie CH je třeba při použití této strategie zohlednit vysokou časovou náročnost výroby a případně upřednostnit také velice obstojnou strategii S.

Tab. 8 Vliv skenovací strategie a srovnání hodnot

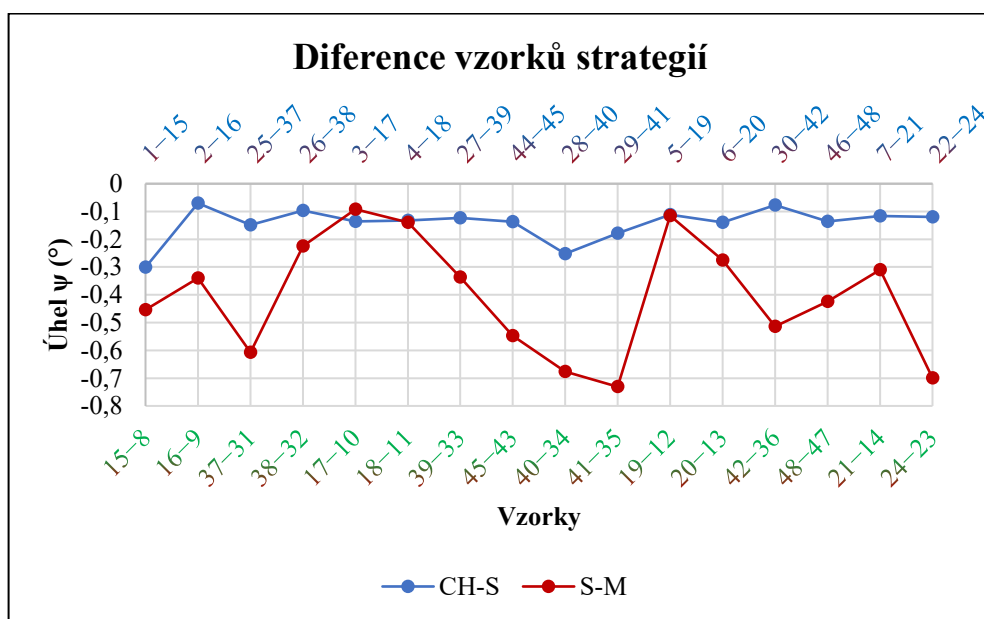
Vliv skenovací strategie			
Parametr	Úhel $\psi$ (°)		
Skenovací strategie	Průměr		SMODCH
CH	1,194		0,170
S	1,336		0,174
M	1,741		0,184
Vzájemné srovnání strategií (t-test, $\alpha = 0,05$ )			
Parametr	p-hodnota	Stat. výz. ( $p<\alpha$ )	Srovnání s lepším = 100 (%)
Strategie M/S	0,0000	ANO	130,324
Strategie S/CH	0,0312	ANO	111,903
Strategie M/CH	0,0000	ANO	145,836



Obr. 39 Vliv skenovací strategie

Tab. 9 Diference vzorků strategií

Diference úhlu deformace totožných vzorků různých strategií					
Dif <sub>1</sub> = CH-S (°)		Dif <sub>1</sub> (%)	Dif <sub>2</sub> = S-M (°)		Dif <sub>2</sub> (%)
1-15	-0,301	-20,859	15-8	-0,454	-26,032
2-16	-0,070	-5,414	16-9	-0,340	-24,945
25-37	-0,149	-11,506	37-31	-0,607	-42,036
26-38	-0,097	-7,019	38-32	-0,224	-15,145
3-17	-0,136	-9,891	17-10	-0,092	-6,089
4-18	-0,132	-10,030	18-11	-0,139	-9,599
27-39	-0,123	-9,165	39-33	-0,336	-22,935
44-45	-0,137	-12,221	45-43	-0,547	-43,482
28-40	-0,252	-27,068	40-34	-0,676	-57,143
29-41	-0,178	-21,317	41-35	-0,731	-72,162
5-19	-0,111	-9,391	19-12	-0,115	-8,894
6-20	-0,139	-12,014	20-13	-0,275	-21,219
30-42	-0,077	-6,337	42-36	-0,514	-39,783
46-48	-0,136	-12,500	48-47	-0,424	-34,641
7-21	-0,116	-9,814	21-14	-0,310	-23,883
22-24	-0,120	-12,658	24-23	-0,699	-65,449



Obr. 40 Diference vzorků strategií

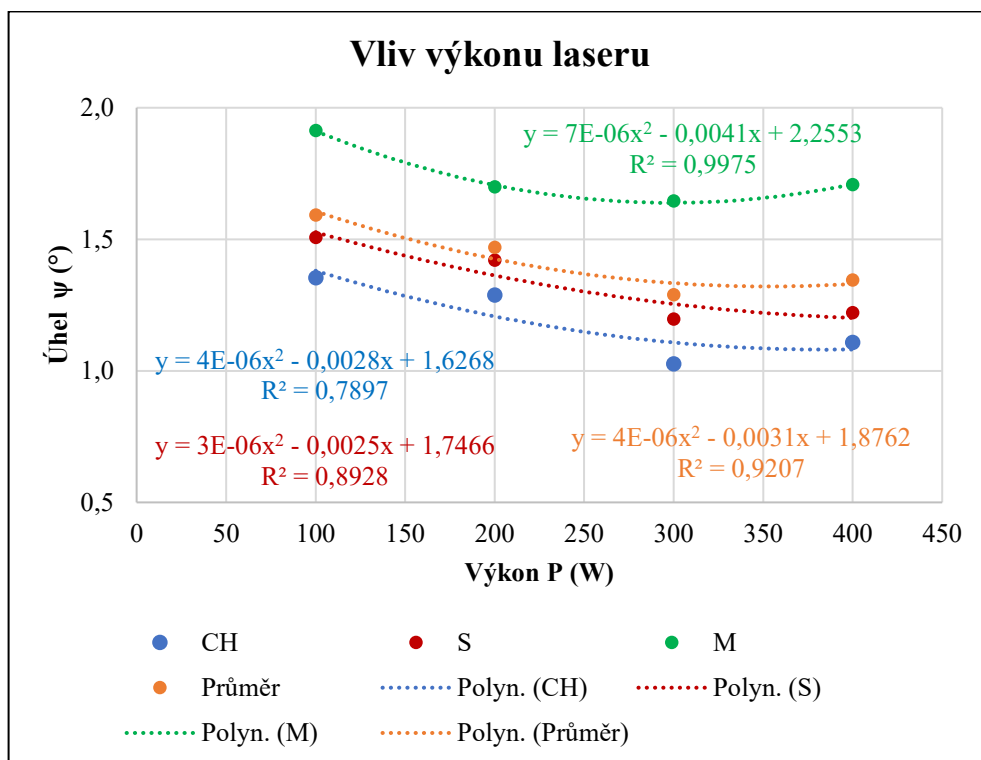
## 7.2.2 Vliv výkonu laseru

**H2:** S rostoucím výkonem laseru se snižují zbytková napětí. (Malý a kol., 2019).<sup>28</sup>

Nejnižší průměrné úhly deformací byly u všech strategií zaznamenány při výkonu laseru 300 W, což dokládá Tab. 10. V tomto případě byl posuzován výkon laseru bez ohledu na vliv jiných faktorů, jako je zejména přehřev. Celkový průměrný úhel deformace u vzorků vyráběných při tomto výkonu laseru byl  $(1,289 \pm 0,261)^\circ$ . Statisticky významný rozdíl mezi výkony laseru byl nalezen až mezi výkonem 100 W a 300 W ( $p \approx 0$ ), mezi výkonem laseru 400 W a 300 W byl rozdíl nejméně významný. U všech strategií byl nalezen totožný trend, který bylo možné vyjádřit polynome 2. stupně, jehož grafem je parabola, viz Obr. 41. U hodnot průměru to byla parabola s vysokou hodnotou spolehlivosti  $R^2 = 0,92$ . S rostoucím výkonem laseru tedy vnitřní zbytková napětí klesají, ale jen do výkonu 300 W, v jehož blízkosti se nachází minimum (vrchol) paraboly, dále je trend již rostoucí. Hypotézu H2, lze tedy přijmout pouze v omezeném rozsahu výkonů laseru.

Tab. 10 Vliv výkonu laseru a srovnání hodnot

Vliv výkonu laseru					
Parametr	Úhel deformace strategie $\psi$ ( $^\circ$ )				
Výkon laseru (W)	CH	S	M	Průměr	SMODCH
100	1,353	1,508	1,914	<b>1,592</b>	0,236
200	1,289	1,421	1,699	<b>1,469</b>	0,171
300	1,026	1,196	1,646	<b>1,289</b>	0,261
400	1,108	1,221	1,707	<b>1,345</b>	0,260
Vzájemné srovnání výkonů laseru napříč strategiemi (t-test, $\alpha = 0,05$ )					
Parametr	p-hodnota	Stat. výz.	Srovnání s <b>nejlepším</b> (%)		
100 vs <b>300</b>	<b>0,0000</b>	<b>ANO</b>	<b>123,436</b>		
200 vs <b>300</b>	0,1106	NE	113,961		
400 vs <b>300</b>	0,6529	NE	104,343		



Obr. 41 Vliv výkonu laseru

### 7.2.3 Vliv výkonu laseru se zohledněním přehřevu

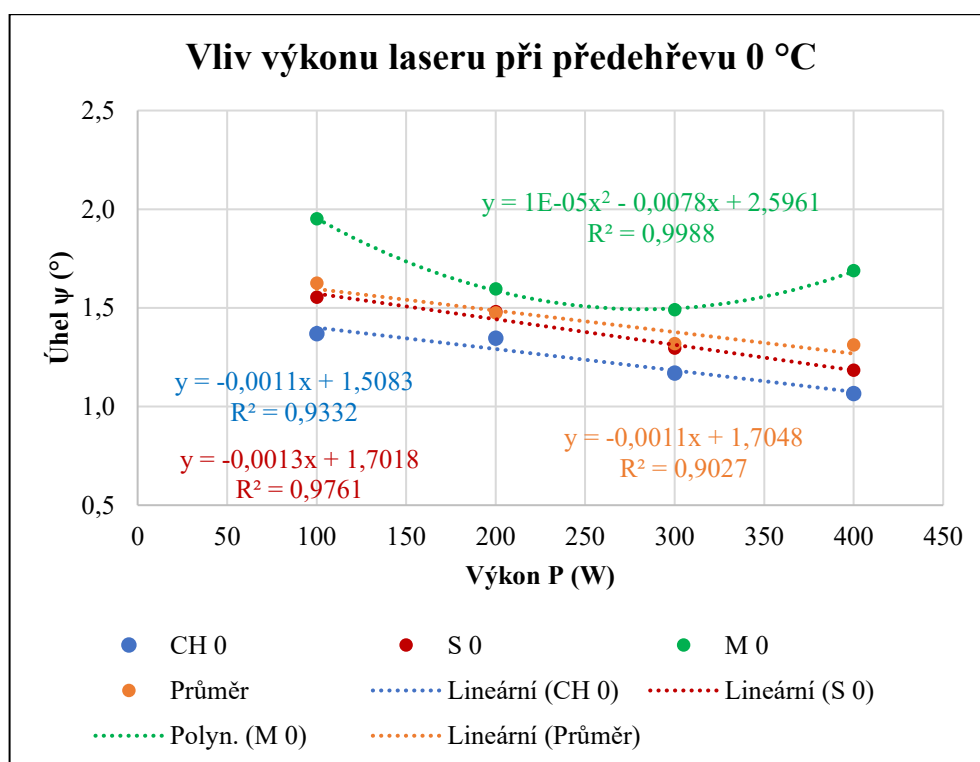
**H2:** S rostoucím výkonem laseru se snižují zbytková napětí. (Malý a kol., 2019).<sup>28</sup>

Větší vypovídající hodnotu může mít zohlednění vlivu použití přehřevu nebo jeho absence. Při posuzování vlivu výkonu laseru v kombinaci s přehřevem 0 °C byl nejnižší úhel deformace nalezen při výkonu laseru 400 W, a to u strategie CH a S, respektive 300 W u strategie M, viz Tab. 11. Celkový nejnižší průměrný úhel deformace byl tedy u výkonu 400 W a to  $(1,312 \pm 0,270)$  °. Nejvýznamnější rozdíl byl mezi výkonem laseru 200 W a 400 W, ale rozdíl nebyl statisticky významný ( $p = 0,14$ ), což bylo ovlivněno anomálním chováním v případě strategie M. K aproximaci bodů byly u strategie CH a S použity lineární funkce a u strategie M polynom 2. stupně, viz Obr. 42. Strategie M se tedy chovala odlišně i přesto byl průměrný trend vyjádřen významně klesající lineární funkcí. Hypotézu H2, lze tedy přijmout pouze u strategie CH a S a v omezeném rozsahu výkonů laseru také u strategie M.



Tab. 11 Vliv výkonu laseru při předehřevu 0 °C a srovnání hodnot

Vliv výkonu laseru při předehřevu 0 °C					
Parametr	Úhel deformace strategie $\psi$ (°)				
Výkon laser (W)	CH	S	M	Průměr	SMODCH
100	1,368	1,554	1,951	<b>1,624</b>	0,243
200	1,346	1,480	1,595	<b>1,473</b>	0,102
300	1,170	1,295	1,490	<b>1,318</b>	0,132
400	1,065	1,183	1,688	<b>1,312</b>	0,270
Vzájemné srovnání hodnot parametrů napříč strategiemi (t-test, $\alpha = 0,05$ )					
Parametr	p-hodnota	Stat. výz.	Srovnání s <b>nejlepším</b> (%)		
100 vs <b>400</b>	<b>0,1364</b>	NE	<b>123,796</b>		
200 vs <b>400</b>	0,3058	NE	112,311		



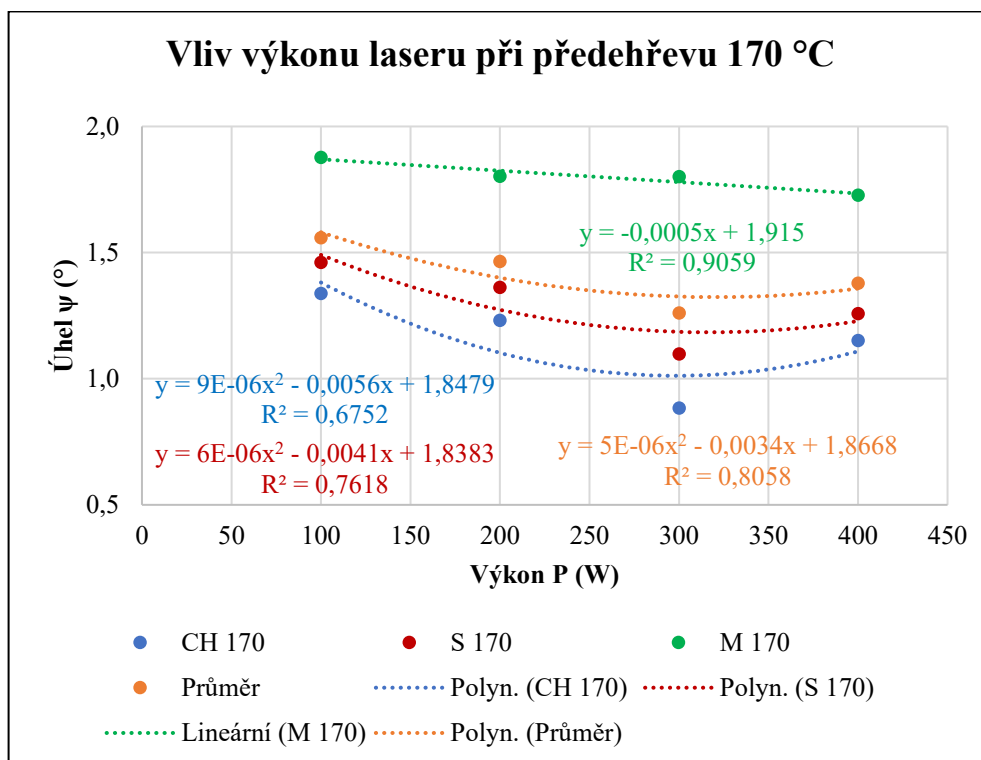
Obr. 42 Vliv výkonu laseru při předehřevu 0 °C

V případě posuzování vlivu výkonu laseru v kombinaci s předehřevem 170 °C byl nejnižší úhel deformace nalezen při výkonu laseru 300 W u strategie CH a S a 400 W u strategie M, viz Tab. 12. Celkový nejnižší průměrný úhel deformace byl patrný u výkonu 300 W a to  $(1,261 \pm 0,392)^\circ$ . Nejvýznamnější rozdíl byl mezi výkonem laseru 100 W a 300 W, avšak rozdíl nebyl statisticky významný ( $p = 0,24$ ), a je nutno zohlednit odlišné chování u strategie M. K aproximaci bodů byly u strategie CH a S použity polynomy 2. stupně a u strategie M lineární funkce, viz Obr. 43. Chování v případě výkonu laseru v kombinaci s předehřevem bylo tedy ve srovnání s chováním při výkonu laseru s absencí předehřevu odlišné, a to u všech strategií. Hypotézu H2, lze tedy přijmout u strategie M a v omezeném rozsahu výkonů laseru také u strategie CH a S.

Je možné říci, že v případě použití předehřevu je pro snížení zbytkových vnitřních napětí vhodnější použít výkon laseru 300 W a v případě absence předehřevu je zase vhodnější využít výkon laseru 400 W. Vysoký výkon laseru v kombinaci s předehřevem měl však nepříznivý vliv na kvalitu povrchu, viz Obr. 37. Srovnání výkonu laseru 300 W bez použití předehřevu a s použitím předehřevu ukazuje na statisticky velmi nevýznamný rozdíl ( $p = 0,79$ ), viz Tab. 12, což naznačuje velmi nízký význam předehřevu. K relevantnějším výsledkům by bylo vhodné posuzovat větší počet vzorků a pouze u jedné skenovací strategie. Strategie M totiž vykazuje vyšší hodnoty úhlů deformace, chová se odlišně a zkresluje tak výsledky, což dokazuje vysoká směrodatná odchylka průměrných hodnot. U strategie M byla také proměnná šrafovací vzdálenost, s čímž se měnila i hustota vyzářené energie, a to může právě způsobovat zkreslení výsledků oproti strategiím CH a S, u kterých se hustota vyzářené energie měnila pouze s měnícím se výkonem laseru. Proto se jeví jako vhodnější vyhodnocovat každou strategii zvlášť.

Tab. 12 Vliv výkonu laseru při předehřevu 170 °C a srovnání hodnot

Vliv výkonu laseru při předehřevu 170 °C					
Parametr	Úhel deformace strategie $\psi$ (°)				
Výkon laser (W)	CH	S	M	Průměr	SMODCH
100	1,339	1,462	1,877	1,559	0,230
200	1,232	1,362	1,803	1,465	0,245
300	0,883	1,098	1,802	1,261	0,392
400	1,152	1,258	1,727	1,379	0,250
Vzájemné srovnání hodnot parametrů napříč strategiemi (t-test, $\alpha = 0,05$ )					
Parametr	p-hodnota	Stat. výz.	Srovnání s nejlepším (%)		
100 vs 300	0,2378	NE	123,648		
200 vs 300	0,4103	NE	116,219		
300/0 vs 300/170	0,7922	NE	104,045		



Obr. 43 Vliv výkonu laseru při předehřevu 170 °C

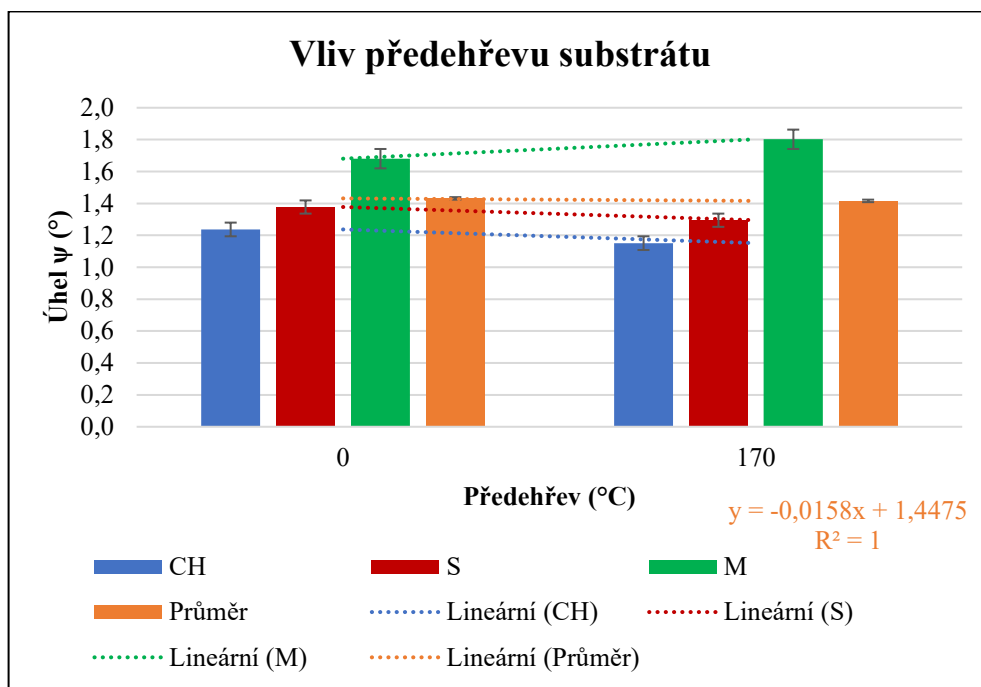
## 7.2.4 Vliv předehřevu substrátu

**H3:** Předehřev substrátu snižuje zbytková napětí. (Shiomi a kol., 2004).<sup>26</sup>

Nejnižší úhel deformace byl při předehřevu 170 °C, a to u strategie CH a S, respektive při předehřevu 0 °C u strategie M, což je patrné z Tab. 13 a z Obr. 44. Celkový nejnižší průměrný úhel deformace byl tedy u předehřevu 170 °C a to  $(1,416 \pm 0,279)$  °. Nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl mezi použitím předehřevu a absencí předehřevu ( $p = 0,86$ ). Hypotézu H3, tedy není možné přijmout, jelikož snížení zbytkových napětí při použití předehřevu nebylo zaznamenáno u všech strategií, a tam kde bylo zaznamenáno nebylo statisticky významné. V případě použití předehřevu je třeba zohlednit zvýšenou časovou a finanční náročnost výroby. Pokud by byl k experimentu použit materiál, který má při ohřevu fázové přeměny, pravděpodobně by se vliv předehřevu projevil mnohem více.

Tab. 13 Vliv předehřevu substrátu a srovnání hodnot

Vliv předehřevu substrátu					
Parametr	Úhel deformace strategie $\psi$ (°)				
Předehřev (°C)	CH	S	M	Průměr	SMODCH
0	1,237	1,378	1,681	1,432	0,185
170	1,151	1,295	1,802	1,416	0,279
Vzájemné srovnání hodnot parametrů napříč strategiemi (t-test, $\alpha = 0,05$ )					
Parametr	p-hodnota	Stat. výz.	Srovnání s nejlepším (%)		
0 vs 170	0,8553	NE	101,112		



Obr. 44 Vliv přehřevu substrátu

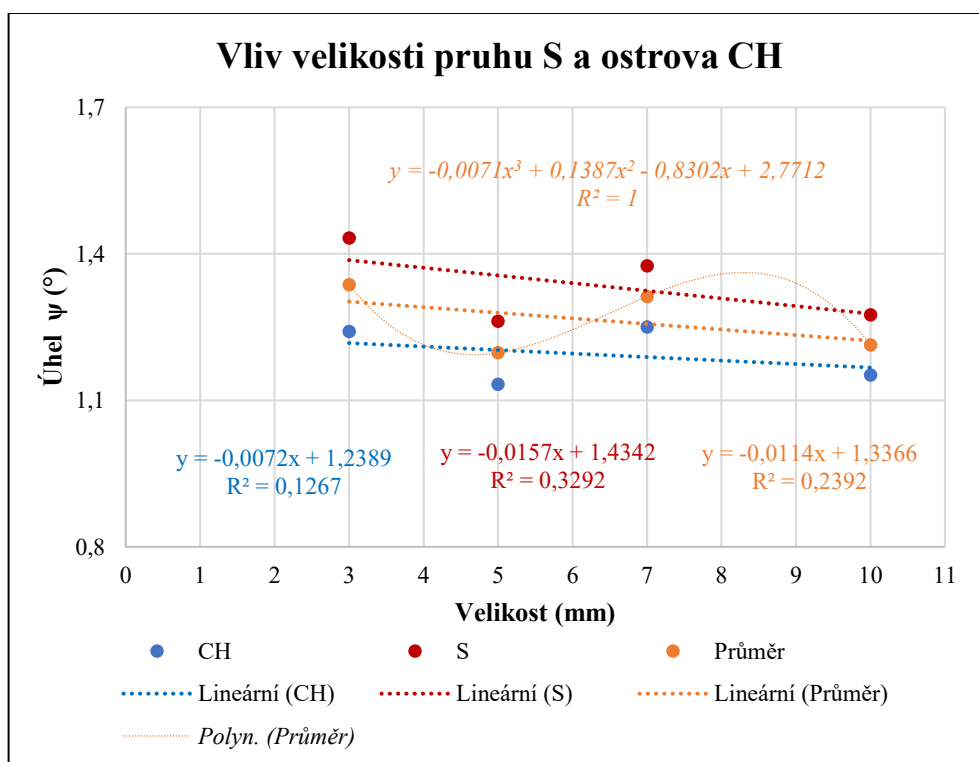
### 7.2.5 Vliv velikosti pruhu a ostrova

**H4:** Kratší skenovací vektory snižují zbytková napětí (Mercelis a kol., 2006).<sup>24</sup>

Skenovací vektory v podobě pruhu jsou charakteristické pro strategii S a skenovací vektory v podobě ostrůvků zase pro strategii CH. Nejpriznivější vliv na úhel deformace měla velikost pruhu a ostrova 5 mm (Tab. 14), kdy bylo dosaženo hodnoty průměrného úhlu deformace ( $1,198 \pm 0,065$ ) °. Statistická významnost mezi velikostmi skenovacích vektorů však nebyla nalezena. Nejvýznamnější rozdíl byl mezi velikostmi vektorů 3 mm a 5 mm ( $p = 0,24$ ) a naopak rozdíl mezi velikostmi vektorů 10 mm a 5 mm byl zanedbatelný ( $p = 0,87$ ). K aproximaci bodů byla použita lineární funkce, ale korelace je slabá, což dokazuje velmi nízká hodnota spolehlivosti  $R^2$ , viz Obr. 45. Trend funkce je slabě klesající, což znamená, že s rostoucí velikostí skenovacích vektorů mírně klesá úhel deformace, tudíž nelze přijmout hypotézu H4. Navíc nejkratší skenovací vektory paradoxně i největší úhel deformace. Z polohy veškerých bodů v grafu lze soudit, že by byla vhodná aproximace, respektive interpolace spíše klesajícím polynomem třetího stupně (Obr. 45), ale není jisté, zda by se takto skenovací vektory reálně chovaly.

Tab. 14 Vliv velikosti pruhu S a ostrova CH a srovnání hodnot

Vliv velikosti pruhu S a ostrova CH				
Parametr	Úhel deformace strategie $\psi$ (°)			
Velikost ls, l <sub>CH</sub> (mm)	CH	S	Průměr	SMODCH
3	1,241	1,433	1,337	0,096
5	1,133	1,262	1,198	0,065
7	1,250	1,375	1,313	0,062
10	1,152	1,275	1,214	0,062
Vzájemné srovnání hodnot parametrů dané strategie (t-test, $\alpha = 0,05$ )				
Parametr	p-hodnota	Stat. výz.	Srovnání s <b>nejlepším</b>	
3 vs 5	0,2351	NE	111,628	
7 vs 5	0,3281	NE	109,614	
10 vs 5	0,8732	NE	101,347	



Obr. 45 Vliv velikosti pruhu S a ostrova CH

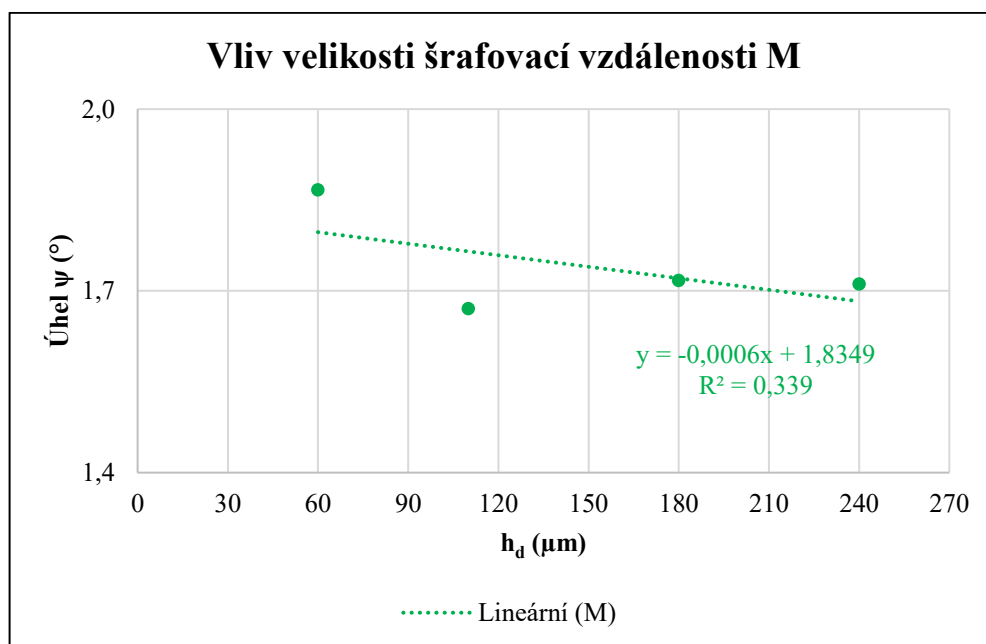
## 7.2.6 Vliv šrafovací vzdálenosti

**H5:** Se zvětšující se šrafovací vzdáleností se zmenšují deformace (Pohl a kol., 2001).<sup>27</sup>

Šrafovací vzdálenost byla proměnná pouze u strategie M. Nejmenší průměrný úhel deformace byl patrný při šrafovací vzdálenosti 110  $\mu\text{m}$  a to  $(1,671 \pm 0,059)^\circ$ , viz Tab. 15. Šrafovací vzdálenost 110  $\mu\text{m}$  je zároveň výrobcem doporučovaná hodnota pro průměr laseru 70  $\mu\text{m}$ . Nejvýznamnější rozdíl byl nalezen mezi velikostí šrafovací vzdálenosti 60  $\mu\text{m}$  a 110  $\mu\text{m}$ , ale nešlo o statisticky významný rozdíl ( $p = 0,18$ ). Body v grafu byly s nízkou hodnotou spolehlivosti proloženy lineární funkcí, která má klesající trend (Obr. 46). Lze sice predikovat, že se zvětšující se šrafovací vzdáleností se zmenšuje úhel deformace, ale nejlepších výsledků bylo dosaženo již při šrafovací vzdálenosti 110  $\mu\text{m}$ , tudíž nelze bezpečně potvrdit hypotézu H5.

Tab. 15 Vliv velikosti šrafovací vzdálenosti M a srovnání hodnot

Vliv velikosti šrafovací vzdálenosti M			
Parametr	Úhel deformace $\psi$ (°)		
Šrafovací vzdálenost (μm)	Průměr	SMODCH	
60	1,867	0,214	
110	1,671	0,059	
180	1,717	0,238	
240	1,712	0,089	
Vzájemné srovnání hodnot parametrů dané strategie (t-test, $\alpha = 0,05$ )			
Parametr	p-hodnota	Stat. výz.	Srovnání s nejlepším
60 vs 110	0,1769	NE	111,733
1800 vs 110	0,7534	NE	102,784
240 vs 110	0,5306	NE	102,454



Obr. 46 Vliv velikosti šrafovací vzdálenosti M



### 7.3 Komplexní zhodnocení parametrů a diskuze

**H6:** Největší vliv na zbytková napětí má předehřev a výkon laseru (Malý a kol., 2019).<sup>28</sup>

V rámci ANOVA analýzy (Tab. 16, Obr. 47) byl posuzován procentuální účinek zkoumaných parametrů na snížení zbytkových napětí a jejich statistická významnost. Jedná se o účinek na změnu úhlu deformace, ať už pozitivně či negativně. Parametry s vysokým účinkem mají vysoký podíl na změně úhlu deformace a vyplatí se je tedy optimalizovat na základě podrobnějších zjištění z předchozí kapitoly. Je patrné, že u všech strategií měl největší účinek výkon laseru, který přispíval na změnu úhlu deformace ze 79,3 % u strategie CH, ze 72,1 % u strategie S a z 53,1 % u strategie M. Menší podíl tvořila velikost ostrůvku u CH s příspěvkem 12,3 %, velikost pruhu u S s příspěvkem 20,8 % a šrafovací vzdálenost u M s příspěvkem 28,1 %. Je patrné, že správná volba velikosti pruhu u S a zejména šrafovací vzdálenosti může mít význam, tedy alespoň u strategie M tomu tak bylo. Bylo by tedy vhodné testovat vliv šrafovací vzdálenosti také u strategie CH a S. Předehřev má podíl vesměs nejmenší a zdá se, že zásadnější vliv má pouze u strategie M a to 18,7 %. Statistická významnost ( $p = 0,01$ ) byla nalezena pouze u výkonu laseru strategie CH a S.

Z analýzy vytvořené napříč všemi strategiemi (Tab. 16, Obr. 48) vzešlo, že naprosto nejzásadnější význam činící 75,5 % má právě skenovací strategie. Menší, ale také významný účinek má výkon laseru, a to 19,1 %. Skenovací strategie i výkon laseru měli statisticky významný vliv ( $p \approx 0$ ). Ostatní parametry byly statisticky nevýznamné ( $p = 0,18$ ) a jejich účinek tvořil 5,3 %. Předehřev je nevýznamný ( $p = 0,77$ ) a nemá prakticky žádný vliv činící pouze 0,09 %. Z těchto výsledků plyne, že nejpodstatnější význam má volba skenovací strategie s následnou volbou výkonu laseru. Teprve poté se má smysl zabývat i volbou šrafovací vzdálenosti, případně délky skenovacích vektorů u CH a S. Jejich vliv je však třeba ještě dále testovat v rámci podrobnějších a citlivějších experimentů. Hypotézu H6, která říká, že největší podíl na snížení zbytkových napětí má předehřev a výkon laseru byla potvrzena jen pro výkon laseru. Je třeba zohlednit, že srovnávací experimenty pracovaly s odlišnými materiály. V případě zkoumané oceli 316L neměl předehřev takřka žádný vliv.

Nejnižší průměrný úhel deformace byl u strategie CH a S zaznamenán při výkonu laseru 300 W v kombinaci s předehřevem 170 °C, viz Tab. 17. V případě strategie CH činila hodnota tohoto úhlu  $(0,883 \pm 0,048)^\circ$  a u strategie S  $(1,098 \pm 0,085)^\circ$ . U strategie M byl nalezen nejvyšší průměrný úhel deformace  $(1,490 \pm 0,082)^\circ$  při výkonu laseru 300 W v kombinaci s předehřevem 0 °C. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u dominantní strategie CH. Při důrazu na produktivitu a vnesení nízkých vnitřních zbytkových napětí lze doporučit spíše strategii S. Jak již bylo zmíněno strategie M se chová odlišně, což může být bráno jako jisté specifikum dané strategie způsobené krátkými a zároveň velmi dlouhými skenovacími vektory. Případně jde o vliv měnicí se šrafovací vzdáleností nebo chybu měření, která může mít také celou plejádu příčin. Právě v případě použití skenovací strategie M je třeba vzít

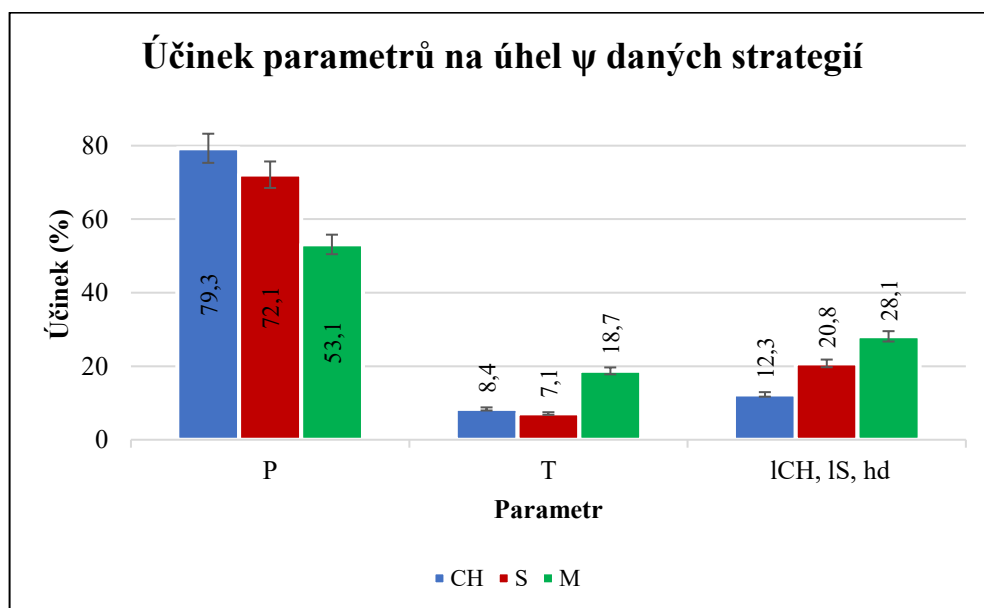
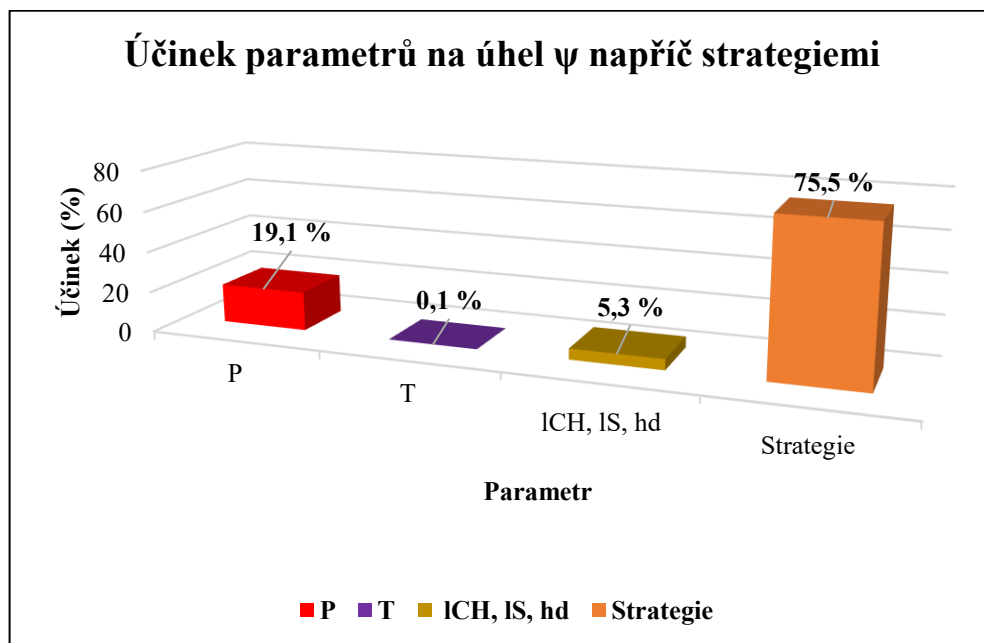
v potaz, že při skenování rozměrných ploch mohou být skenovací vektory velmi dlouhé. Anomálie v chování strategie M je však nutné potvrdit a objasnit dalšími testy. Celkový nejnižší průměrný úhel deformace byl tedy generován při výkonu laseru 300 W v kombinaci s přehřevem 170 °C a to 1,261 °. A zdá se, že jsou to právě tyto parametry v kombinaci se skenovací strategií CH nebo S, při kterých jsou do výrobku z oceli 316L vnesena nejmenší zbytková napětí. Vzhledem k tomu, že přehřev má zanedbatelný vliv, bude ekonomicky výhodnější jej nepoužít a navýšit výkon laseru na 400 W. V tomto případě byl průměrný úhel deformace jen zanedbatelně vyšší a to 1,312 °. Zjištěná doporučení však platí primárně pro výrobky z oceli 316L, které jsou vyráběny na stroji Renishaw AM 400. Zda lze doporučení paušalizovat i pro jiné kovové materiály zpracovávané na jiných strojích by bylo nutné ověřit dalšími testy. Co se však týče skenovacích strategií, tak jejich vliv byl v experimentu natolik signifikantní, že lze říci že totožných výsledků by bylo dosaženo napříč celou škálou materiálů a strojů na bázi SLM.

Tab. 16 ANOVA analýza parametrů

ANOVA (1 faktor) analýza parametrů strategie CH ( $\alpha = 0,05$ )								
Parametr	SS	Dif	MS	F	p-hodnota	F krit	Stat. výz.	Účinek (%)
P	0,279	3	0,093	6,036	<b>0,010</b>	3,490	ANO	<b>79,285</b>
T	0,029	1	0,029	0,950	0,346	4,600	NE	8,379
l <sub>CH</sub>	0,043	3	0,014	0,413	0,747	3,490	NE	12,336
Suma	0,352	7						100,000
ANOVA (1 faktor) analýza parametrů strategie S ( $\alpha = 0,05$ )								
Parametr	SS	Dif	MS	F	p-hodnota	F krit	Stat. výz.	Účinek (%)
P	0,278	3	0,093	5,380	<b>0,014</b>	3,490	ANO	<b>72,097</b>
T	0,027	1	0,027	0,842	0,374	4,600	NE	7,133
l <sub>S</sub>	0,080	3	0,027	0,792	0,522	3,490	NE	20,770
Suma	0,385	7						100,000
ANOVA (1 faktor) analýza parametrů strategie M ( $\alpha = 0,05$ )								
Parametr	SS	Dif	MS	F	p-hodnota	F krit	Stat. výz.	Účinek (%)
P	0,167	3	0,056	1,782	0,204	3,490	NE	<b>53,133</b>
T	0,059	1	0,059	1,707	0,212	4,600	NE	18,735
h <sub>d</sub>	0,089	3	0,030	0,780	0,527	3,490	NE	28,132
Suma	0,315	7						100,000
ANOVA (2 faktory s opakováním) analýza parametrů napříč strategiemi ( $\alpha = 0,05$ )								
	SS	Dif	MS	F	p-hodnota	F krit	Stat. výz.	Účinek (%)
P	0,653	3	0,218	10,217	<b>0,000</b>	2,866	ANO	<b>19,100</b>
T	0,003	1	0,003	0,091	0,765	4,073	NE	0,087
l <sub>CH</sub> , l <sub>S</sub> , h <sub>d</sub>	0,183	3	0,061	1,715	0,181	2,866	NE	5,347
Strategie	2,581	2	1,290	39,404	<b>0,000</b>	3,220	ANO	<b>75,466</b>
Suma	3,420	9						100,000

Tab. 17 Srovnání nejlepších hodnot

Srovnání nejlepších hodnot								
Parametr	Úhel deformace strategie $\psi$ (°)							
Strategie	CH		S		M		Průměr	
Parametr	$\bar{x}$	$s_x$	$\bar{x}$	$s_x$	$\bar{x}$	$s_x$	$\bar{x}$	$s_x$
P 300 W	1,026	0,147	1,196	0,115	1,646	0,171	1,289	0,261
P/T 300 W/0 °C	1,170	0,013	1,295	0,002	1,490	0,082	1,318	0,132
P/T 300 W/170 °C	0,883	0,048	1,098	0,085	1,802	0,058	1,261	0,392
P/T 400 W/0 °C	1,065	0,117	1,183	0,115	1,688	0,079	1,312	0,270
P/T 400 W/170 °C	1,152	0,064	1,258	0,034	1,727	0,079	1,379	0,250

Obr. 47 Účinek parametrů na úhel  $\psi$  daných strategiíObr. 48 Účinek parametrů na úhel  $\psi$  napříč strategiemi

## 7.4 Zhodnocení experimentu a diskuze opatření

**H7:** Metoda BCM je rychlá a spolehlivá metoda (Malý a kol., 2019).<sup>28</sup>

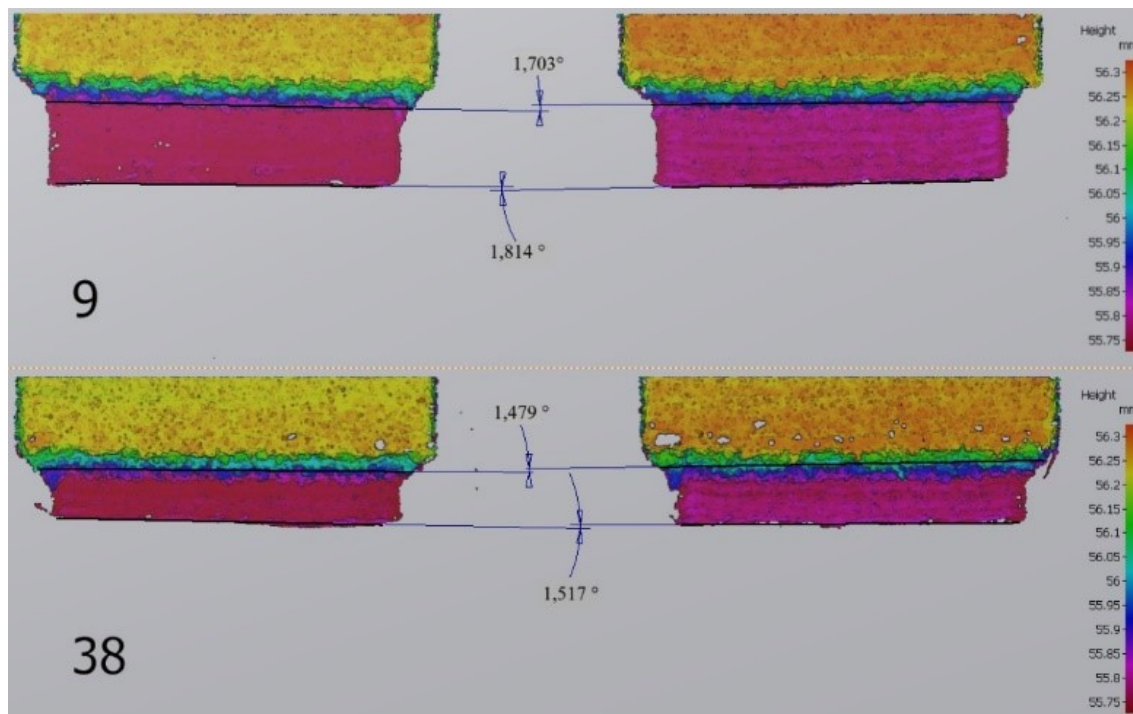
Jelikož se úhel deformace na horní ploše vzorku projevil nedostatečně a měření na řezné hraně mohlo být ovlivněno nekvalitním řezem po průchodu pilovým pásem. Proto bylo přistoupeno k měření na hraně vzorku určené k vedení pilového pásu. Výsledky měření však mohly být ovlivněny zejména přesností výroby měřené hrany vzorku. Hrana vzorku byla u mnoha vzorků dosti nekvalitní, zvláště při interakci vysokého výkonu laseru a přehřevu. Z tohoto důvodu by bylo vhodnější vzorky ze základní desky separovat pomocí EDM drátového řezání, kde je kvalita řezu mnohem vyšší. Tato technologie však není tolik dostupná. Kromě vizuálního zhodnocení vzorků se nabízí také měření drsnosti povrchu, rozměrové přesnosti, případně také porozity. Bylo by pak možné posuzovat vliv procesních parametrů i na tyto kvalitativní parametry.

Velký vliv měla také přesnost metody měření úhlu. Ruční pokládání přímek v CAD systému na hranu výrobku bylo zcela jistě zatíženo chybou, kterou by bylo možné vyjádřit standardní nejistotou typu B. Z tohoto důvodu lze jako alternativu místo snímání mikroskopem zvolit snímání ručním 3D skenerem s následným vyhodnocením úhlu porovnáním skenu s 3D CAD modelem. Ruční skener může být také mnohem mobilnější a dostupnější než optický mikroskop, obzvláště, když dílenský mikroskop je nedostatečný. V případě dostupnosti 3D souřadnicového přístroje, je možné změřit úhel deformace i na něm. Možností je také provést dodatečná měření na totožném místě vzorku nebo na odvrácené straně vzorku a vypočíst průměrnou hodnotu včetně nejistoty typu A. Vše by bylo možné ověřit ještě totožným měřením na další sadě vyrobených vzorků.

Pro názornost bylo měření u všech vzorků provedeno taktéž na řezné hraně (Obr. 49) a srovnáno s původním měřením (Obr. 50). Měření je znázorněno na vzorku číslo 9. Pomocí oboustranného dvou výběrového párového t-test na střední hodnotu bylo zjištěno, že se měření mezi sebou statisticky významně neliší ( $p = 0,303$ ), tudíž lze říci, že by bylo možné spolehlivě měřit i na řezné hraně vzorku, a tak byla také ověřena správnost a přesnost měření. Klíčové bylo odstranění otřepů z řezných hran.

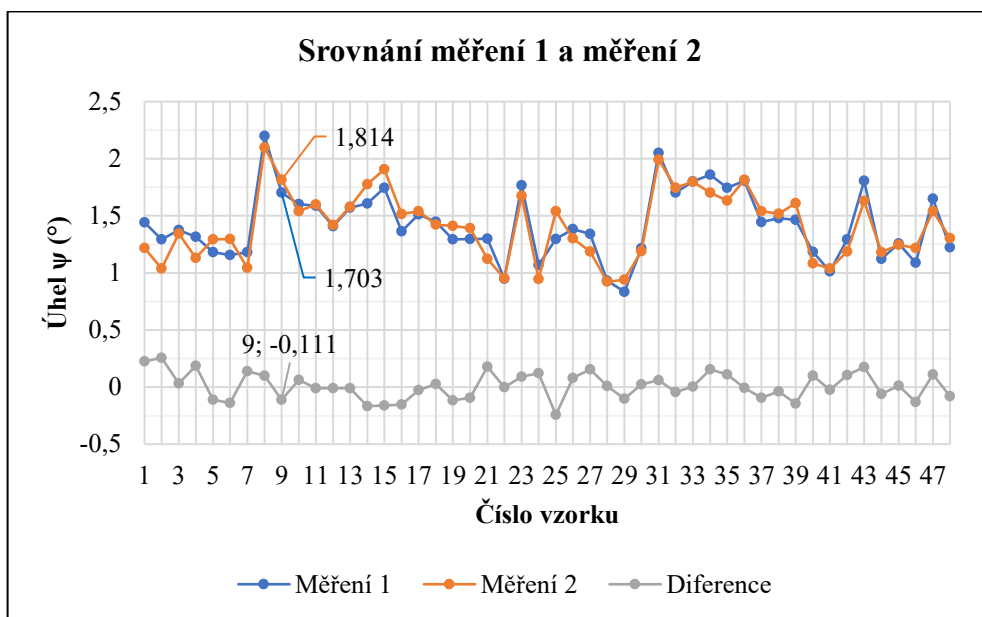
Jako alternativní experiment bylo navrženo měření rozteče otvorů před deformací a po deformaci vzorku, viz Obr. 51. Princip je takový, že by se před separací vzorků vytvořily na jejich horní ploše otvory určité rozteče a po jejich separaci ze základové desky by se změnila změna rozteče otvorů a z té vyhodnotila deformace. Vytvoření otvorů by bylo možné pomocí stojanové vrtačky a vrtacího přípravku. Měření rozteče pak mechanicky pomocí měřidla s kuželovými doteky. Tato metoda by pak nebyla závislá na použití optického mikroskopu, 3D skeneru nebo 3D souřadnicového přístroje. Úhel deformace by pak bylo možné dopočítat z podobnosti trojúhelníků. Jelikož se však úhel deformace na horní ploše vzorku výrazně neprojevil, předpokládá se že i změna rozteče děr by byla měřitelná jen citlivějším měřidlem.

Celý experiment splňoval předpoklady v podobě praktičnosti, jednoduchosti a rychlosti. Metodou BCM lze zjišťovat a ověřovat vlivy mnoha parametrů a jejich interakcí na poměrně malém počtu vzorků. Díky interakcím parametrů může dojít ke zkreslení výsledků, tudíž je vhodné provést další experimenty již se zaměřením na vliv pouze určitých parametrů a v rámci pouze jedné strategie. Prvotní sada vzorků může sloužit k hrubšímu odhadu a další sady vzorků již mohou mít užší zaměření s citlivějšími výsledky. Předpokladem je dostupnost měřicích nebo snímacích přístrojů. Způsob měření je možné vždy přizpůsobit možnostem podniku, ale zároveň je potřeba spolehlivost alternativního experimentu vždy ověřit alespoň srovnáním s výsledky relevantních studií. Metoda BCM jistě nepatří mezi nejpřesnější, ale při jejím správném provedení jsou dosažené výsledky zcela jistě signifikantní. To také dokazuje určitá shoda dosažených výsledků s výsledky a doporučeními z jiných odborných studií. Taktéž jistá shoda mezi prvotním měřením 1 a zkušebním měřením 2 napovídá o relevantnosti experimentu. Lze tedy potvrdit hypotézu H7, že metoda BCM, i když tomto případě v pozměněné formě oproti původní verzi splnila veškerá očekávání. Tento experiment tak lze v budoucnu znovu použít, a to nejlépe s navrženými opatřeními, které jej mají povýšit. Zjištěný úhel deformace reprezentuje uvolněná zbytková napětí, která by bylo možné zjistit simulací naměřeného úhlu na 3D CAD modelu pomocí MKP. V budoucnu by pak bylo vhodné například pomocí regresního modelu softwaru Minitab nalézt funkci vzájemného vztahu procesních parametrů, která by umožňovala predikovat potenciální úhel deformace.

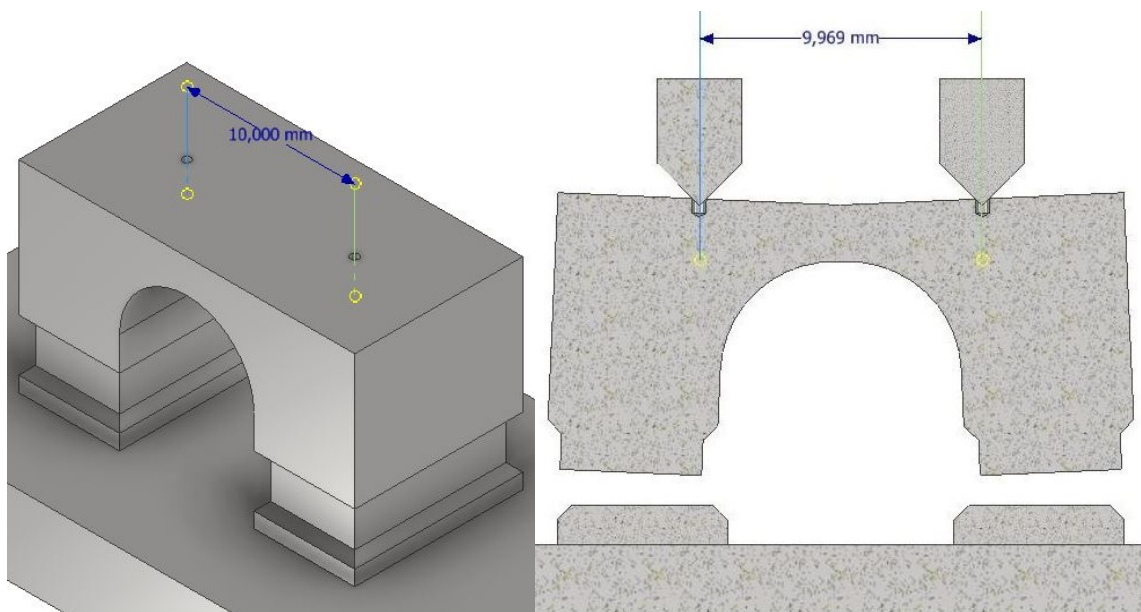


Obr. 49 Srovnání původního měření 1 s měřením 2 uskutečněném na řezné hraně vzorku





Obr. 50 Srovnání měření 1 a měření 2



Obr. 51 Návrh alternativního experimentu s využitím změny rozteče děr (demonstrováno na úhlu 5°)

## Závěr

Diplomová práce byla rozčleněna na teoretickou a empirickou část. V teoretické části této práce byly seskupeny nutné znalosti a výsledky odborných studií, které posloužily k úspěšnému vykonání experimentu. Diplomová práce měla za primární cíl zjistit, jaký má vliv skenovací strategie na velikost zbytkových vnitřních napětí u vzorků vyrobených z oceli 316L metodou SLM. Sekundárně byl také zjišťován vliv vybraných procesních parametrů na velikost zbytkových vnitřních napětí. Jednalo se o výkon laseru, přehřev, velikost pruhu, ostrova a šrafovací vzdálenost. Vybrány byly skenovací strategie Chessboard, Stripes a Meander. Pomocí metodiky DoE byl zvolen dostatečný počet vzorků pro pokrytí všech proměnných parametrů. K vyhodnocování vnitřních zbytkových napětí byla použita rychlá metoda BCM, jejíž princip je založen na měření úhlu deformace vzorku po jeho separaci ze základní desky. Navržené vzorky mostové geometrie byly vyrobeny na stroji Renishaw AM 400, separovány ze základní desky pomocí pásové pily Pegas, jejich deformace byla nasnímaná na optickém mikroskopu Alicona, úhel deformace byl naměřen v CAD softwaru Inventor a vyhodnocen v softwaru Microsoft Excel.

Nejnižší průměrný úhel deformace vykazovaly vzorky vyrobené skenovací strategií CH a to  $(1,194 \pm 0,170)^\circ$ . Druhá v pořadí byla strategie S s průměrným úhlem deformace  $(1,336 \pm 0,174)^\circ$ , což je o 11,9 % více než u strategie CH. Největší úhly deformace byly u strategie M s průměrným úhlem deformace  $(1,741 \pm 0,184)^\circ$ , což je o 30,3 % více než u strategie S a o 45,8 % více než u strategie CH. Rozdíl mezi všemi strategiemi byl statisticky významný ( $p \simeq 0$ ), s tím, že mezi strategií CH a S byl rozdíl nejtěsnější ( $p = 0,031$ ). Lze tedy říci, že nejnižší zbytková napětí jsou do vzorku vnesena v případě použití strategií, které se vyznačují krátkými skenovacími vektory v podobě pruhu nebo ostrůvku.

Při posuzování vlivu výkonu laseru s absencí přehřevu bylo zjištěno, že úhel deformace klesá lineárně s rostoucím výkonem laseru. V případě výkonu laseru s interakcí přehřevu  $170^\circ\text{C}$  bylo zjištěno, že úhel deformace klesá pouze do výkonu laseru 300 W a poté roste. Použití přehřevu mělo zanedbatelný pozitivní vliv. Strategie M vykazovala oproti ostatním strategiím odlišné chování, které mohlo být způsobeno velkou variabilitou délky skenovacích vektorů nebo proměnnou šrafovací vzdáleností. Nejpriznivější vliv na úhel deformace měla velikost skenovacích vektorů strategií CH a S 5 mm. Šrafovací vzdálenost byla posuzována pouze u strategie M a nejlépe se jevila hodnota  $110\ \mu\text{m}$ , což je zároveň výrobcem doporučená hodnota.

Volba skenovací strategie měla na změnu úhlu deformace vzorků naprosto nejzásadnější vliv. Menší, ale také velice významný účinek měl výkon laseru. Šrafovací vzdálenost a velikost skenovacích vektorů pak měla již poměrně malý účinek. A absolutně nejmenšího účinku dosahoval přehřev. Z toho plyne, že volba skenovací strategie a výkonu laseru má zcela zásadní význam. Až poté se má smysl zabývat i optimalizací šrafovací vzdálenosti,



případně délkou skenovacích vektorů u CH a S. Jejich vliv je však třeba ještě dále testovat v rámci podrobnějších a citlivějších experimentů a nejlépe zvlášť u každé strategie.

Při důrazu na produktivitu a vnesení nízkých vnitřních zbytkových napětí lze doporučit kompromis v podobě strategie S. Celkový nejnižší průměrný úhel deformace byl sice generován při výkonu laseru 300 W v kombinaci s předehřevem 170 °C 1,261 °, ale vzhledem k zanedbatelnému vlivu předehřevu lze doporučit spíše ekonomičtější variantu s výkonem laseru 400 W a absencí předehřevu, kdy byl zjištěn pouze nepatrně vyšší úhel deformace, který činil 1,312 °. Použití vysokého výkonu laseru a předehřevu mělo negativní vliv na kvalitu povrchu vzorků. Ocel 316L nemá fázové přeměny, což může být důvod pro nízký projev předehřevu. Zjištěná doporučení pro minimalizaci vnitřních zbytkových napětí však platí primárně pro výrobky z oceli 316L, které jsou vyráběny na stroji Renishaw AM 400. Optimalizaci je nutné provést vždy pro konkrétní materiál. Na odlišné materiály a stroje lze s jistotou paušalizovat zjištěný vliv skenovacích strategií, který byl zcela zjevný.

Jelikož mohly být výsledky měření ovlivněny zejména přesností výroby měřené hrany vzorku, bylo by vhodnější vzorky ze základní desky separovat pomocí EDM drátového řezání, kde je řez mnohem kvalitnější než v případě pásové pily. Celý experiment splnil předpoklady a výsledky z něj lze považovat za relevantní, což dokazuje i určitá shoda s výsledky z jiných odborných studií. Postupně byly splněny veškeré cíle a zodpovězeny veškeré stanovené otázky a hypotézy. Výsledky z tohoto experimentu lze použít pro optimalizaci výroby komponent z oceli 316L metodou SLM na stroji Renishaw AM 400. Dále může být tento experiment výchozím pro další experimenty, které využijí zjištěných poznatků a posunou se tak kvalitativně zase mnohem dál. Především je nutné experimenty dále rozvíjet, opakovat a zaměřit se na testování s užším zaměřením. Tato práce je tedy přínosem pro tento vědní obor i praxi.

## Seznam použité literatury

1. YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews* [online]. 2015, **2**(4), 1-22 [cit. 2020-01-22]. DOI: 10.1063/1.4935926. ISSN 1931-9401. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4935926>
2. GU, D D, W MEINERS, K WISSENBAACH a R POPRAWE. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews* [online]. 2013, **57**(3), 133-164 [cit. 2020-01-22]. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014. ISSN 0950-6608. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743280411Y.0000000014>
3. WONG, Kaufui V. a Aldo HERNANDEZ. A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering* [online]. 2012, **2012**, 1-10 [cit. 2020-01-22]. DOI: 10.5402/2012/208760. ISSN 2090-5130. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/archive/2012/208760/>
4. Začínáme s 3D tiskem kovů #3: Předvýrobní etapa (topologická optimalizace). *Konstrukter* [online]. 2016 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobní-etapa-topologicka-optimalizace/>
5. CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping. Hackensack, New Jersey: World Scientific, [2015], s. 518. ISBN 978-981-4571-40-1.
6. ISO/ASTM 52900. *Additive manufacturing-General principles-Terminology*. 2015.
7. REDWOOD, Ben. Additive Manufacturing Technologies: An Overview. *3dhubs* [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/#introduction>
8. 7 Families of Additive Manufacturing. *Hybrid Manufacturing Technologies* [online]. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <http://www.hybridmanutech.com/resources.html>

9. CHERDO, Ludivine. The Best Metal 3D Printers in 2019. *Aniwaa* [online]. 2019 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/best-of/3d-printers/best-metal-3d-printer/>
10. Začínáme s 3D tiskem kovů #1: Příprava laboratoře. *Konstruktér* [online]. 2016 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-1/>
11. Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM). *Konstruktér* [online]. 2016 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
12. Začínáme s 3D tiskem kovů #4: Příprava výroby v řešení QuantAM. *Konstruktér* [online]. 2017 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-4-priprava-tisku-v-reseni-quantam/>
13. SLM stampante 3d schema funzionamento – stampa 3d forum 2. *Stampa3Dforum.it* [online]. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://www.stampa3d-forum.it/come-funziona-stampante-3d/slm-stampante-3d-schema-funzionamento-stampa-3d-forum-2/>
14. YADROITSEV, Igor. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, c2009. ISBN 9783838317946.
15. HAJNYŠ, Jiří. *Výzkum vlivu dokončovacích operací na modifikaci užitných vlastností součástí vyrobených aditivní technologií*, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 122 stran, 64 obrázků, 29 tabulek. Školitel: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
16. SIMSON, Thomas, Andreas EMMEL, Anja DWARS a Juliane BÖHM. Residual stress measurements on AISI 316L samples manufactured by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2017, 17, 183-189 [cit. 2020-01-22]. DOI: 10.1016/j.addma.2017.07.007. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860417301604>

17. DOUBENSKAIA, Maria, Alexey DOMASHENKOV, Igor SMUROV a Pavel PETROVSKIY. Study of Selective Laser Melting of intermetallic TiAl powder using integral analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2018, **129**, 1-14 [cit. 2020-03-16]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.02.003. ISSN 08906955. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695518300464>
18. Magics training: Material profile editing. *Renishaw*. United Kingdom, 2006. Dostupné z: <https://www.renishaw.com>
19. 7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing. *Engineering* [online]. 2017 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15202/7-Issues-to-Look-Out-for-in-Metal-3D-Printing.aspx>
20. QIU, Chunlei, Mohammed Al KINDI, Aiman Salim ALADAWI a Issa Al HATMI. A comprehensive study on microstructure and tensile behaviour of a selectively laser melted stainless steel. *Scientific Reports* [online]. 2018, **8**(1) [cit. 2020-03-01]. DOI: 10.1038/s41598-018-26136-7. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/s41598-018-26136-7>
21. Koukal J., Zmydlený T., 2005: *Svařování I*. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 133 s., ISBN: 80-248-0870-6.
22. Zbytková napětí. *Wikiwand* [online]. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: [https://www.wikiwand.com/cs/Zbytkov%C3%A1\\_nap%C4%9Bt%C3%AD#](https://www.wikiwand.com/cs/Zbytkov%C3%A1_nap%C4%9Bt%C3%AD#)
23. BLAŽÍČEK, D. Hodnocení povrchových a podpovrchových vlastností obráběného povrchu metodou analýzy Barkhausenova šumu (BNA). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 62 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jiří Švejcar, CSc.
24. MERCELIS, Peter a Jean-Pierre KRUTH. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2006, **12**(5), 254-265 [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.1108/13552540610707013. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552540610707013/full/html>

25. KRUTH, Jean-Pierre, Jan DECKERS, Evren YASA a Ruben WAUTHLÉ.  
Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2012, **226**(6), 980-991 [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.1177/0954405412437085. ISSN 0954-4054. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405412437085>
26. SHIOMI, M., K. OSAKADA, K. NAKAMURA, T. YAMASHITA a F. ABE.  
Residual Stress within Metallic Model Made by Selective Laser Melting Process. *CIRP Annals* [online]. 2004, **53**(1), 195-198 [cit. 2020-03-01]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60677-5. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607606775>
27. POHL, H., SIMCHI, A., ISSA, M., DIAS, H. *Thermal stresses in direct metal laser sintering*. In: Proceedings of the 12th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas [online]. 2001, 366-372 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/2001/2001-41-Pohl.pdf>
28. MALÝ, Martin, Christian HÖLLER, Mateusz SKALON, Benjamin MEIER, Daniel KOUTNÝ, Rudolf PICHLER, Christof SOMMITSCH a David PALOUŠEK. Effect of Process Parameters and High-Temperature Preheating on Residual Stress and Relative Density of Ti6Al4V Processed by Selective Laser Melting. *Materials* [online]. 2019, **12**(6) [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.3390/ma12060930. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/6/930>
29. VRANCKEN, Vrancken. *Study of Residual Stresses in Selective Laser Melting* [online]. Leuven, 2006 [cit. 2020-03-01]. Disertační práce. KU Leuven – Faculty of Engineering Science, Prof. dr. ir. Jan Van Humbeeck. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/45289375.pdf>
30. ALI, Haider, Hassan GHADBEIGI a Kamran MUMTAZ. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2018, **712**, 175-187 [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.103. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509317315630>

31. Odvrtávací metoda (metoda otvoru). *ttp.zcu* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/detaily-metody>
32. VÁCLAVÍK, Jaroslav, Zbyněk BUNDA, Petr BOHDAN a Otakar WEINBERG. *APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ* [online]. Seč, 2012 [cit. 2020-03-16]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. Dostupné z: [http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/271\\_p.pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/271_p.pdf)
33. AM 400. *PTSC Tooling & Metrology* [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://ptscmetrology.com/am-400/>
34. Práškové kovy. *Renishaw* [online]. [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/praskove-kovy--31458>
35. Katalogové listy-Aditivní výroba: Data sheet SS 316L-0407 powder for additive manufacturing. *Renishaw* [online]. 2018 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/katalogove-listy-aditivni-vyroba--17862>
36. Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2.html>
37. Powder Production: Methods of AM metal powder production. *CARPENTER ADDITIVE* [online]. Philadelphia [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.carpenteradditive.com/technical-library/>
38. Schaeffler diagram – for range of standard analysis. *Migal.co* [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.migal.co/english/service/welding-stainless-steels/schaeffler-diagram-for-standard-analysis/>
39. THEODORE, A. Introduction to engineering statistics and lean sigma: statistical quality control and design of experiments and systems. 2nd ed. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-84882-999-2.
40. Dimensional metrology & roughness measurement: InfiniteFocus. *Bruker alicon* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocus/>



41. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2004, Část 1. ISBN 80-248-0672-1.